JANUAR 2006 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

- Künstliche kalte Antimaterie
- Weltgrößtes Teleskop für kosmische Strahlen
- Lawinenschutz aus dem All?
- Ray Kurzweil prophezeit den Menschen 2.0

www.spektrum.de

GENETIK

Auf der Fährte der Mutationen

Genetische Varianten im Erbgut enthüllen, wie sich der Mensch über die Erde verbreitet hat

ASTROPHYSIK

Galaktische Wellen

EPIDEMIOLOGIE

Gerüstet für die Grippe-Pandemie?

SPEZIAL ARCHÄOLOGIE

Zerstörten Dürrekatastrophen antike Kulturen?

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Schöne neue Welten

Unglücklich der Geist, der um Künftiges bangt.
»Essais«, Michel de Montaigne (1533–1592)

Liebe Spektrum-Leser,

unaufhörlich rast die Zukunft auf uns zu und mehr oder weniger gekonnt werfen wir uns in den Strom der Zeit. Zukunft ist implizit auch das Thema dreier Beiträge in dieser Ausgabe: über das weltgrößte Observatorium, die drohende Grippepandemie sowie die Visionen von Ray Kurzweil über den Umbau des Menschen zu einer »Version 2.0«.

Als ich kürzlich in Argentinien an der Einweihungsfeier des Pierre-Auger-Observatoriums zur Beobachtung kosmischer Strahlen teilnahm, sah ich, wie damit auch symbolisch ein Fenster zum Weltall weiter aufgestoßen wurde. Die Mikrogeschosse bringen die Forscher schier zur Verzweiflung: Kein Mensch weiß, woher sie stammen – eines der letzten großen Rätsel der Astrophysik (S. 12). Doch Geheimnisse sind das Salz der Wissenschaft; und so bildete der Event in Argentinien nur einen Mosaikstein innerhalb der gerade laufenden Entdeckung des heißen Kosmos, angetrieben durch die Geburt der Teilchenastrophysik im letzten Jahrzehnt. Das meint neuartige Detektoren und Observatorien, mit denen derzeit nach Gravitationswellen, nach der kosmischen »Dunklen Energie« und nach Hochenergie-Gammastrahlen gespäht und revolutionäre Physik betrieben wird – mit Neutrinos und der direkten Bestimmung ihrer Masse. Ein neues Bild des Universums zeichnet sich ab.

Währenddessen bedrängen uns auf der Erde andere Fragen, die gleichfalls drohen – oder versprechen, unsere Zukunft zu dominieren. Es ist nicht die Frage, ob, sondern nur, wann ein hochansteckendes Influenzavirus die nächste Pandemie auslöst – darin sind sich Epidemiologen einig. Wie die Pläne aussehen, um dieser globalen Bedrohung zu begegnen, berichten wir ab S. 72.

Mit solchen Details gibt sich Ray Kurzweil bei der Betrachtung der Zukunft nicht ab. Dem amerikanischen Erfinder und Visionär geht es darum, sich (und uns) auszumalen, wie Technologien, die sich exponentiell entwickeln, in wenigen Jahrzehnten den Menschen verändern werden. Kurzweil, dessen Essay ich durchaus auch als Polemik verstehe, weitet seine vergangenen Prophetien diesmal auf die biologische Neugestaltung des menschlichen Körpers und seines Gehirns aus. Dass er mit allem Recht hat, bezweifle ich. Aber wenn auch nur ein Viertel davon eintreffen wird, dann gehen wir, wie die Chinesen gerne sagen, »interessanten Zeiten« entgegen (S. 100).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

Wissen aus erster Hand

spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

Die Redaktion von spektrumdirekt informiert Sie online schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.

www.spektrumdirekt.de/info

INHALT

SPEKTROGRAMM

8 Urzeit-Godzilla · Schnecken-Sex · Neue Plutomonde · Licht der ersten Sterne · Älteste Kirche? u. a.

11 **Bild des Monats**
Neues vom Urvogel

FORSCHUNG AKTUELL

▶ 12 **Der Super-Teilchenfänger in der Pampa** 🔊
Das größte irdische Teleskop spürt der kosmischen Strahlung nach

14 **Auf der Fährte der Lepra**
Wie sich die Seuche einst über den Erdball ausbreitete

16 **Vampire gegen Schlaganfall**
Fledermausenzym verhütet nachträgliches Absterben von Hirnzellen

19 **Der Flug des Kolibris** 🔊
Schwirrende Kolibris ahmen teilweise Flugtechnik der Insekten nach

THEMEN

▶ 22 ASTRONOMIE
Entwicklung von Spiralgalaxien

▶ 30 TITELTHEMA GRÜNDERMUTATIONEN
Geschichtsträchtige Genspuren

▶ SPEZIAL ARCHÄOLOGIE

42 MAYA
Was Sedimente verraten

50 CHINA
Von Baumringen und Regenmengen

56 ANASAZI
Software-Agenten in Not

▶ 62 ANTIMATERIE
Künstlicher kalter Antiwasserstoff

▶ 72 INFLUENZA
Rüsten gegen eine Pandemie 🔊

▶ 84 KATASTROPHENSCHUTZ
Satelliten zeigen Lawinengefahr 🔊

▶ 100 ESSAY
Provokante Verheißung: Update für den Menschen

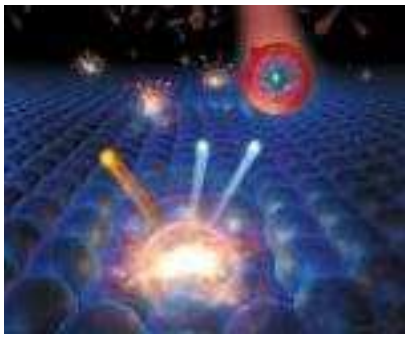
Titelbild: Mutationen, die dauerhaft ihre Spuren im Erbgut hinterlassen, verraten einiges über die menschliche Geschichte
Phil Saunders, Space Channel Ltd.

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet;
die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe:
www.spektrum.de/audio

ASTRONOMIE SEITE 22

Galaktische Wellen

Spiralgalaxien gleichen wirbelnden Feuerrädern. Die Ursache dieser Struktur haben Astronomen erst in den letzten Jahren ergründet: ein Wechselspiel zwischen den Bahnen der Sterne und interstellarem Gas



SEITE 62

ANTIMATERIE

Künstliche kalte Antiatome

Atome aus Antiteilchen kommen im uns bekannten Universum nicht vor. Seit Kurzem lässt sich aber Antiwasserstoff herstellen. Nun gilt es, diese Antiatome so zu verlangsamen, dass an ihnen eine fundamentale Symmetrie getestet werden kann

SEITE 72

INFLUENZA

Grippepandemie: Sind wir gewappnet?

Die Welt rüstet sich gegen eine drohende globale Epidemie. Mit Überwachungsmaßnahmen, Medikamenten und neuen Impfstoffen kann es gelingen, die Seuche im Keim zu ersticken oder wenigstens einzudämmen

SPEZIAL ARCHÄOLOGIE

AB SEITE 42

Maya

SEITE 42

Warum verließen sie plötzlich ihre Städte auf Yukatan? Meeressedimente liefern neue Indizien

China

SEITE 50

Mehrfach griff das Kaiserreich erfolglos nach Nordtibet. Uralter Wacholder verrät den Grund des Scheiterns

Anasazi

SEITE 56

Der rätselhafte Exodus der Anasazi im Computermodell: wenn Software-Agenten Indianer spielen

SCIENTIFIC AMERICAN INDIA

TITELTHEMA **GRÜNDERMUTATIONEN** **SEITE 30**

Spurensuche im Erbgut

Verräterische Gensequenzen mit besonderen Änderungen geben Hinweise auf die Migration von Menschengruppen über die Jahrtausende. Die Länge der Sequenzen verrät zudem, wann der »Gründer« der Gruppe, bei dem eine solche Mutation erstmals auftrat, gelebt hat

SEITE 84

FERNERKUNDUNG

Lawinenschutz aus dem All?

Bei instabiler Schneedecke genügt ein unvorsichtiger Skifahrer, um eine Katastrophe auszulösen. Satellitentechnik soll künftig helfen, Risikozonen leichter aufzuspüren

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 100

ESSAY

Der Mensch, Version 2.0

Wie wird der Mensch in dreißig Jahren aussehen? Ray Kurzweil, der amerikanische Erfinder und Visionär, hält einen radikalen Umbau der menschlichen Biologie für machbar und sogar für unausweichlich

JANUAR 2006

KOMMENTAR

20 **Springers Einwürfe**
Holland, die Hydrometropole

WISSENSCHAFT IM …

40 **Alltag:** Eine Decke für die Straße

81 **Rückblick:** Mozarts Ohr · Per Auto zum Südpol u. a.

JUNGE WISSENSCHAFT

82 **Ein Putzroboter für die Mama**
Schülerwettbewerb »Faszination Technik«

REZENSIONEN

90 **Vulkanismus verstehen und erleben** von Gerd Simper
Warum der Mensch glaubt von Martin Urban
Biomedizin und Ethik von Hans-Peter Schreiber (Hg.)
Mythos Meer von Monika Rößiger und Claus-Peter Lieckfeld
Warum Frauen nicht schwach … sind von Wolfram Henn
PISA, Bach, Pythagoras von Dietrich Paul

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

98 **Himmlisches Ballett**

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial · 6 Leserbriefe/Impressum · 96 Preisrätsel · 106 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN

J.M. ABASCAL, UNIVERSITÄT ALICANTE

Integration nach Römerart

Lasst die Besiegten Geschäfte machen! Wie das Imperium unterworfene Völker integrierte, erkunden Archäologen in Spanien

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE
NACH ANMELDUNG MIT KUNDENNUMMER

LESERBRIEFE

»Theologie ist die demütigere Wissenschaft«

Streitgespräch, November 2005

Frage nach dem Woher, Warum, Wohin

Naturwissenschaft und Religion ergänzen sich. Mit unterschiedlichen Methoden gehen sie der menschlichen Urfrage nach dem Woher, Warum, Wohin nach und wollen dem Menschen eine Lebensperspektive geben.

Beim »Woher« helfen mir sicher wissenschaftliche Erkenntnisse weiter, aber schon beim »Warum« bin ich im Zweifel und beim »Wohin« finde ich bisher nur eine Antwort in Gott.

Dr. Reinhard Born, Immenstaad

Suche nach Bedeutung

Eine verantwortliche Theologie wird im 21. Jahrhundert keinesfalls hinter das naturwissenschaftliche Weltbild zurückfallen wollen. Im Gegenteil lernen wir Theologen dankbar alles, was in anderen Wissenschaften über Welt und Mensch ans Licht gebracht wird.

Wir sind überzeugt: Glaube und Wissen können kein Widerspruch sein. Insoweit muss auch Theologie sich mit der Zeit wandeln – wie sich naturwissenschaftliche Weltbilder wandeln. Und sie tut dies auch – allerdings oft zu langsam. Natürlich erledigen sich theologische Vorstellungen ebenso wie naturwissenschaftliche immer wieder. Aber wir geben doch die Physik auch nicht einfach auf, nur weil Newton in mancher Hinsicht »zu kurz gesprungen ist«.

Ich bin der Ansicht, Theologie hat wesentlich mit der Suche nach »Bedeutung« und insofern auch Deutung von Sachverhalten zu tun. Bedeuten Welt und Bewusstsein uns irgendetwas? Können wir religiöse Traditionen so mit modernen Weltbildern in ein Gespräch bringen, dass daraus Antworten auf die großen Fragen der Menschen entstehen wie: Was ist der Sinn meines Lebens? Wie soll oder muss ich leben? Hat die kosmische Reise ins Nichts doch irgendein Ziel?

Ralph T. Strack, Bockenem

Reaktion auf nicht erklärbare Vorgänge

Nach meiner »Gottessicht« ist »Gott« die physikalische Eigenschaft der Teilchen, sich zu bewegen und miteinander zu reagieren. Die Komplexität der Teilcheneigenschaften, ihrer Massen, Bewegungen und ihrer möglichen Interaktionen bedingt einen dynamischen Trend, der zu dem Phänomen des astronomischen Kosmos (Gravitation, Kernverschmelzung, Sterne, Galaxien, Planeten) führt und unter ganz bestimmten, sehr seltenen – im kosmischen Maßstab dennoch sehr häufigen – Umständen zur Entstehung von Leben und zwangsläufig zur Evolution führt.

Gott ist also eine materieimmanente Eigenschaft, die einfach »ist«, einen Grund dafür gibt es nicht. Ihn zu suchen, entstammt dem menschlichen Ursache-Wirkungs-Verständnis. Die (für den menschlichen Geist auf seiner heutigen evolutionären Stufe) nahezu unfassbare Kompliziertheit der physikalischen, chemischen, biologischen Vorgänge ist die Folge der unendlichen Interaktionsmöglichkeiten der Agenzien. »Religion« ist die Reaktion des kleinen menschlichen Geistes auf für ihn nicht erklärbare Vorgänge – quasi eine Kapitulation vor der nicht zu bewältigenden Aufgabe, das Sein zu verstehen.

Wolfgang Ternes, München

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com

PETER ARNOLD INC. / UNEP / MONICA TERRAZAS GLAVAN

▲ Die Reichen oben, die Armen unten; doch letztlich sind alle auf der Erde voneinander abhängig.

Ursachen der Verschuldung

Das Ende des Elends
November 2005

Die armen Länder erhalten seit vielen Jahren Kredite, die aber oft zu gering sind, um grundlegende Veränderungen zu erreichen. Häufig versanken die Gelder auch in den Kanälen der Korruption der herrschenden Gruppen und gelangten nicht an die bedürftigen Stellen.

Die Kredite wurden auch nicht ohne Hintergedanken gegeben. Es waren oft politische Interessen dabei. Die Korruption der Herrschenden in den armen Ländern störte die Geldgeber nicht. Die Zinsen für die Kredite muss die arme Bevölkerung aufbringen. So gerieten die armen Länder in die Verschuldungsfalle. Der Zinsendienst für die Kredite ist in einigen Ländern schon fast so hoch wie das gesamte Wirtschaftsaufkommen eines Jahres. Wo sollen da noch Möglichkeiten für Investitionen sein?

Ein zweiter wesentlicher Punkt ist in diesem Artikel nicht erwähnt: die Subvention der reichen Länder für ihre Agrarprodukte. Auf den afrikanischen Märkten sind dann die aus dem Westen importierten Produkte billiger als die einheimischen. Und die Bauern verarmen.

Walter B. Hähnel, Lübeck

Raubbau wird fortgesetzt

Menschheit am Scheideweg
Oktober 2005

Dass Fischer »ihren Gewinn maximieren, wenn sie Gewässer und einzelne Arten nur auf einem nachhaltigen Niveau bejagen«, klingt logisch, reicht aber nicht aus.

So brachen die ehemals sehr reichhaltigen Fanggründe vor der Küste Westafrikas durch Überfischung weit gehend zusammen. Da sich aber parallel zum Rückgang der Bestände auch die Preise entsprechend erhöht haben, lohnt sich das Fischen weiterhin. Und eine Senkung der Fangquoten wird meistens erst dann akzeptiert, wenn es nichts mehr zu fischen gibt.

Diese Überlegungen lassen sich verallgemeinern. Daher denke ich, dass der Raubbau an der Natur ungehemmt weitergehen wird. Es entbehrt nicht einer gewissen Ironie,

dass unsere moderne Wirtschaftsgesellschaft daran scheitern könnte, dass wir nicht mehr das Äquivalent von Heiligen Kühen (= Ressourcen) haben, die auch in der größten Not nicht angetastet werden dürfen.

Jörg Michael, Hannover

Erinnerungen an Obelix

Übergewicht überbewertet?
Oktober 2005

Der Artikel erinnert mich irgendwie an Obelix: »Hier ist nur einer dick, und der ist nicht dick.«

Vielleicht gibt es auch eine Korrelation zwischen dem BMI der jeweiligen Verfasser und ihren vertretenen Forschungsergebnissen?

Norbert Mundigler, Wien

Darstellung von Blitz-Überschlägen

Vom Blitz getroffen
November 2005

Ein wunderbarer Artikel, der zeigt, wie wenig wir über eine alltägliche wichtige Naturerscheinung wissen.

Es wird darauf hingewiesen, dass ein Blitz meist aus einer Serie von Überschlägen besteht. Allerdings habe ich bisher kein veröffentlichtes Bild gesehen, welches dieses Faktum demonstriert.

Im Sommer 1944 habe ich auf dem Stegskopf (Westerwald) mit einer Baby-Box einige Aufnahmen von Blitzen mit aus der Hand bewegter Kamera gemacht. Leider sind die Negative und Abzüge, bis auf einen, bei Kriegsende verloren gegangen. Hier ein Ausschnitt des gescannten Bildes.

Bedauerlicherweise ist unter den verloren gegangenen Bildern eins gewesen, das möglicherweise von höherem Erkenntniswert gewesen ist. Auch da waren mehrere Überschläge nebeneinander zu sehen. Nach meiner Erinnerung zeigte kein Überschlag eine Verzweigung, aber eine der Bahnen nahm im unteren Drittel einen anderen Verlauf.

Dies lässt mich vermuten, dass Blitze sich nicht – oder nur selten – verzweigen, sondern einzelne Überschläge sich eine andere Bahn suchen.

Ben-Michael Schüler, Hamburg

Blitze bestehen aus einer Serie einzelner Überschläge.

B.-M. SCHÜLER

Energieeinsparung nicht zum Nulltarif

Weniger Energie – mehr Gewinn
Oktober 2005

In einem Sinne hat Lovins Recht. Es gibt ein großes Einsparpotenzial, ohne auf den Nutzen verzichten zu müssen. Es ist allerdings nicht so billig zu haben, wie Lovins es uns glauben machen will. Je mehr wir davon nutzen wollen, desto mehr müssen wir auf teure Techniken zurückgreifen; und wie viel wir davon am Ende bezahlen wollen und können, ist noch nicht ausgemacht.

Dr. Hermann Henssen, Overath

Galileis Gedankenexperiment

Physikalische Unterhaltungen
November 2005

Ich finde diese Idee faszinierend. Galileo Galilei hat im »Dialogo« das Gedankenexperiment der Erddurchbohrung durch den Erdmittelpunkt gemacht, um zu illustrieren, dass Pendelschwingung und freier Fall nach demselben Gesetz ablaufen. Hier seine Formulierungen nach der deutschen Übersetzung:

»wenn die Erde durch den Mittelpunkt hindurch durchbohrt wäre, (würde) eine durch diesen Schacht hindurch sich bewegende Kanonenkugel im Mittelpunkte eine solche Geschwindigkeit erlangen, dass sie infolge derselben über den Mittelpunkt hinaus eine ebenso große Strecke aufwärts getrieben würde, als sie vorher gefallen ist; dabei würde die Geschwindigkeit jenseits des Centrums um die nämlichen Beträge abnehmen, um welche sie beim Absteigen zugenonmmen hat, und die Zeit, welche zu diesem zweiten Teile der Bewegung erforderlich wäre, würde meiner Ansicht nach der für den Fall erforderlichen gleich sein« (etwas schwerfällige Übersetzung von Emil Strauss in: »Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme«, Darmstadt 1982).

Hans Bieri, Schinznach-Bad, Schweiz

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 8114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Achim Schneider, Claus-Peter Sesin.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, D-70597 Stuttgart-Degerloch, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 27 vom 01.01.2006.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2005 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

NATIONAL GEOGRAPHIC 2005

Mit ihrem mächtigen Sägezahngebiss zerfleischte die vier Meter lange Meeresechse *Dakosaurus andiniensis* – links ein Schädelfossil, oben der rekonstruierte Kopf – auch große Beutetiere.

PALÄONTOLOGIE

Urzeit-Godzilla

An das japanische Filmmonster fühlten sich die Forscher erinnert, als sie die fossilen Reste einer riesigen Panzerechse in Patagonien entdeckten. Das gut vier Meter lange Meerestier sah aus wie eine Kreuzung aus einem Krokodil und einem *Tyrannosaurus rex*. Auf vereinzelte Knochen des vorzeitlichen Reptils waren Zulma Gasparini von der argentinischen Universidad National de la Plata und Diego Pol von der Ohio State University schon 1996 gestoßen. Doch erst der Fund zweier Exemplare mit einem fast komplett erhaltenen Schädel zeigte nun, wie das grausige Urvieh aussah: In seiner gut einen Meter langen Schnauze verbargen sich riesige, dolchartige Zähne ähnlich wie bei den an Land lebenden Raubsauriern der gleichen Epoche. Mit diesem Beißwerkzeug zerfleischte *Dakosaurus andiniensis* vor 140 Millionen Jahren offenbar große Beutetiere. Seine ebenfalls im Meer lebenden Verwandten besaßen dagegen lange, schmale Schnauzen mit nadelähnlichen Zähnen und mussten deshalb mit Schnecken und kleinen Fischen vorlieb nehmen. Wie diese unterschied sich das martialische Jura-Reptil von heutigen Krokodilen in einem Punkt: Es hatte Flossen statt Beine. *Science Express, 10. 11. 2005*

ARCHÄOLOGIE

Frühchristliche Mosaike im Knast

Ins Gefängnis gehen die wenigsten freiwillig. Und wer würde dort architektonische Kostbarkeiten suchen? Doch die Haftanstalt von Megiddo im Norden Israels könnte sich zur Touristenattraktion entwickeln. Denn Archäologen haben hier zusammen mit sechzig Häftlingen Reste einer frühchristlichen Kirche freigelegt: einen Mosaikboden mit geometrischen Mustern, altgriechischen Inschriften und einem Fischemblem – dem Symbol der Urchristen (das griechische Wort für Fisch lässt sich als Akronym für »Jesus Christus, Gottes Sohn, Heiland« lesen).

Das genaue Alter des Funds ist noch unklar. Viele Wissenschaftler halten es für unwahrscheinlich, dass die Kirche vor dem 4. Jahrhundert entstanden ist. Bevor nämlich Kaiser Konstantin das Christentum ab dem Jahr 313 tolerierte, konnten dessen Anhänger ihre Rituale nur im Verborgenen ausüben. Der Grabungsleiter Jotam Tepper schließt indes nicht aus, dass die Kirche schon im ersten Jahrhundert Christen als Kultstätte diente. Dafür spricht etwa eine der drei Inschriften, in der eine Frau namens Akeptous als Spenderin eines Tischs genannt ist. Von dem später üblichen Altar fehlt dagegen jede Spur – ebenso wie von einem Kreuz. Vielleicht feierten die frühen Christen in der Tradition ihres Religionsstifters das Abendmahl noch an einem Tisch.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Das Fischemblem und drei Inschriften zeigen: Dieser Mosaikboden gehörte zu einer frühchristlichen Kirche.

ZOOLOGIE

Evolution auf Eis

Die eigentümliche Lebensweise der Pinguine – kürzlich auch im Kino zu besichtigen – macht die Antarktisbewohner zum idealen Studienobjekt für Populationsgenetiker. Ihre Brutplätze sind eine Fundgrube für genetisches Material, das in dem trocken-kalten Klima wie in einer riesigen Tiefkühltruhe lange Zeit unbeschadet überdauert. Zudem kehren die Vögel jeden antarktischen Sommer an den gleichen Ort zurück, um dort ihre Eier auszubrüten. Da einige Küken die ersten Monate nicht überleben, hinterlassen sie reichlich fossile Überreste, die sauber geschichtet Tausende von Jahren dokumentieren.

Dieses Material haben neuseeländische Forscher nun analysiert. Wie sie dabei herausfanden, unterscheidet sich eine heutige Gruppe von Adéliepinguinen genetisch beträchtlich von ihren Vorfahren vor 6000 Jahren. Beim Vergleich sich wiederholender Abschnitte der DNA im Zellkern von fossilen mit heutigen Tieren zeigte sich, dass von neun untersuchten Gensegmenten bei den derzeit lebenden Vögeln vier vergrößert und zwei geschrumpft waren.

Die Forscher erklären sich diesen raschen genetischen Wandel mit wiederholten Eisabbrüchen. Die von ihren Brutplätzen abgeschnittenen Tiere hätten sich jeweils mit Vögeln anderer Gruppen gepaart und deren Erbgut dabei aufgefrischt. *Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 102, S. 16717*

YVETTE WHARTON UND VIVIAN WARD, UNIVERSITY OF AUCKLAND

Pinguine, die beim Abbruch riesiger Eisschollen von ihren Brutplätzen abgeschnitten werden, schließen sich anderen Populationen an.

Kondensstreifen tragen weniger zur globalen Erwärmung bei, als das IPCC meint.

DLR

KLIMA

Entwarnung bei Kondensstreifen

Fliegen ist umweltschädlich: Die Triebwerkabgase verstärken den Treibhauseffekt, und auch die Kondensstreifen tragen zur globalen Erwärmung bei. Dieser Faktor wurde bisher allerdings überschätzt. Nach dem letzten Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sollen die »Dunstfahnen« der Flugzeuge das Klima genauso stark beeinflussen wie das ausgestoßene Kohlendioxid. Tatsächlich beträgt ihr direkter Effekt auf den irdischen Strahlungshaushalt aber höchstens ein Drittel dieses Werts. Das ermittelte ein Team um Robert Sausen vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) nun anhand genauerer Beobachtungsdaten sowie verfeinerter Analysen der mikrophysikalischen Eigenschaften und Häufigkeit von Kondensstreifen.

Allerdings fördern die weißen Striche am Himmel die Bildung von Zirruswolken, die vom Boden abgestrahlte Wärme auf die Erdoberfläche reflektieren. Dabei sind sie nach den neuen Berechnungen bis zu doppelt so wirksam wie bisher gedacht. *Meteorologische Zeitschrift, Bd. 14, S. 555*

VERHALTEN

Spermatausch beim Schnecken-Sex

Sex ist ein schwieriges Pflaster. Das gilt selbst – oder sogar besonders – in der Schneckenwelt. Denn als Zwitter müssen die Tiere beim Tête-à-Tête erst einmal klären, wer denn nun was sein darf. Die Weibchenrolle ist beliebter, weil weniger anstrengend: Schließlich bekommt frau Sperma geschenkt, das mann mühsam produzieren muss. Wie lassen sich da die Interessen der Beteiligten zum Ausgleich bringen?

Das Zauberwort heißt Gegenseitigkeit. Der Geschlechtsakt geht über viele Runden, in denen jeweils die Rollenverteilung wechselt. Dass die Partner dabei peinlich darauf achten, nicht übervorteilt zu werden, hat nun Nils Anthes von der Universität Tübingen an Meeresschnecken der Art *Chelidura hirundina* nachgewiesen. Bei diesen fließt das Sperma durch eine äußere Hautfalte von den Keimdrüsen zum Penis. Anthes verklebte diesen Kanal durch Erhitzen, sodass die Tiere zwar noch kopulieren, aber keinen Samen mehr übertragen konnten. Versuchte eine derart manipulierte Schnecke ihr Glück bei ihresgleichen, kam es regelmäßig zum Eklat: Das enttäuschte Partnertier wandte sich nach kürzester Zeit von ihr ab und beendete brüsk das Liebesspiel. *Current Biology, Bd. 15, S. 792*

NILS ANTHES / CURRENT BIOLOGY

Ohne Sperma kein Sex: Meeresschnecken der Art *Chelidura hirundina* – hier in Yin-Yang-Position beim Koitus – nehmen es da sehr genau.

So könnte Pluto von seinem neuen Mond aus erscheinen – rechts klein sein Begleiter Charon.

NASA / ESA / STSCI, GREG BACON

PLANETOLOGIE

Mehr Monde für Pluto

Nichts Neues unter der Sonne? Mitnichten! Nicht nur, dass in jüngster Zeit etliche Kandidaten für weitere Planeten endeckt wurden – nun gab es auch Zuwachs bei den Monden. Schon Mitte Juni waren dem Planetenjäger Max Mutchler vom Space Telescope Science Institute in Baltimore auf Bildern des Hubble-Weltraumobservatoriums vom Mai zwei neue Objekte in der Nähe von Pluto aufgefallen. Nachdem andere US-Forscher die beiden Körper nun auch auf alten Hubble-Aufnahmen von 2002 aufgespürt haben, steht fest, dass es sich um Trabanten des äußersten Planeten im Sonnensystem handelt.

Ihre Größe läßt sich noch nicht exakt angeben, weil sie nur anhand ihrer Helligkeit geschätzt werden kann, die von der unbekannten Beschaffenheit ihrer Oberfläche abhängt. Mit Durchmessern zwischen 55 und 160 sowie 45 und 130 Kilometern sind die neuen Monde aber in jedem Fall sehr viel kleiner als Plutos bereits bekannter Begleiter Charon. Außerdem umkreisen sie den Planeten in mehr als dem doppelten Abstand: Die Bahnradien von S/2005 P1 und S/2005 P2, wie die Neulinge vorläufig heißen, betragen 49 000 und 65 000 Kilometer.

news@nature.com vom 31. 10. 2005

MEDIZIN

Endlich ein Malaria-Impfstoff?

Die Malaria gehört zu den größten Geißeln der Menschheit. Jährlich erkranken eine halbe Milliarde Menschen an der Seuche und etwa 1,5 Millionen sterben daran – die meisten Kinder. Schon sehr lange suchen Wissenschaftler deshalb nach einem Impfstoff. Nun gibt es einen aussichtsreichen Kandidaten namens RTS,S. Er vereint eine immunstimulierende Komponente eines Proteins des Hepatitis-B-Virus (RTS) mit einem Oberflächenprotein aus Sporozoiten (S), der Form des Malaria-Erregers *Plasmodium falciparum*, die von der Mücke auf den Menschen übertragen wird. Dadurch lenkt das Vakzin die Immunantwort gegen ein frühes Stadium des Parasiten, das noch keine Krankheitssymptome hervorruft.

Bei der jüngsten klinischen Studie verschaffte RTS,S zwar keinen vollständigen Immunschutz. Aber damit geimpfte ein- bis vierjährige Kinder in Mosambik erkrankten in den folgenden 18 Monaten nur halb so häufig an schwerer Malaria wie ihre Altersgenossen. Zur Finanzierung weiterer Studien hat die Bill-und-Melinda-Gates-Stiftung 107,6 Millionen US-Dollar zugesagt. Um einen kompletten Immunschutz zu erzielen, planen die Forscher, den Impfstoff mit weiteren Antigenen des Malaria-Erregers zu kombinieren.

The Lancet online vom 15. 11. 2005

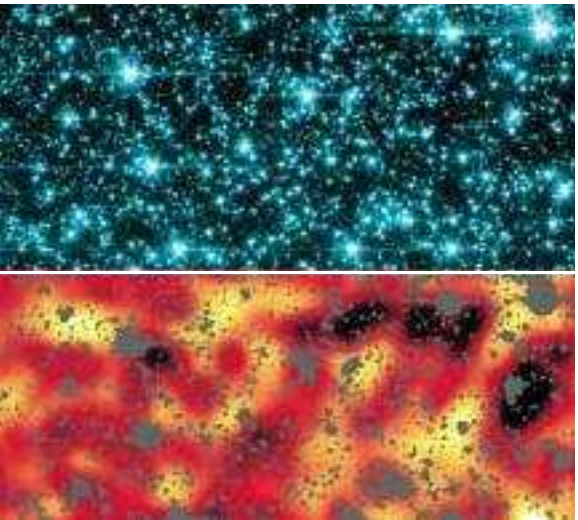
ASTRONOMIE

Spuren der ersten Sterne

Wenn Astronomen ihre Teleskope in die Tiefe des Weltalls richten, blicken sie zugleich in die Vergangenheit. So konnten Forscher am Goddard-Raumfahrtzentrum der Nasa in Greenbelt (Maryland) jetzt das Licht der ersten Sterne entdecken. Diese entstanden schon wenige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall. Simulationen zufolge waren es Giganten mit mehr als hundert Sonnenmassen, die schnell verglühten. Dabei strahlten sie UV-Licht ab, dessen Wellenlänge wegen der Ausdehnung des Weltalls heute im Infrarotbereich liegt – einer Spektralregion, auf die das Spitzer-Weltraumteleskop spezialisiert ist.

Die Nasa-Forscher verwendeten für ihre Analyse deshalb Aufnahmen dieses Observatoriums von einer Region im Sternbild Drachen und filterten Störsignale durch nahe gelegene Galaxien und Sterne sorgfältig heraus. Übrig blieb ein geflecktes Muster aus hellen und dunklen Stellen. Das passt zu Hypothesen, wonach sich die Sterne des frühen Universums zu Clustern zusammenballten – entsprechend den hellen Bereichen im Bild. Die Auflösung der Spitzer-Daten reicht nicht aus, um auch einzelne Sterne abzubilden. Das könnte frühestens gelingen, wenn im Jahr 2013 das noch leistungsstärkere James-Webb-Weltraumteleskop in Betrieb geht.

Nature, 3. 11. 2005, S.45



NASA, JPL, GSFC, ALEXANDER KASHLINSKY / CALTECH

Wird in der Infrarotaufnahme des Spitzer-Teleskops das Licht der näheren Himmelsobjekte (oben) herausgerechnet, erscheinen Cluster der ersten Sterne als helle Bereiche (unten).

Mitarbeit: Stephanie Hügler und Achim G. Schneider

Neues vom Urvogel

Ein jüngst aufgetauchtes zehntes Fossil von *Archaeopteryx*, das nun erstmals beschrieben wurde, gewährt weitere interessante Einblicke in Anatomie, Abstammung und Lebensweise des rund 150 Millionen Jahre alten, elstergroßen Urvogels *(Science, 2. 12. 2005, S. 1483)*. So ähneln die besonders gut erhaltenen Füße weniger denen von Vögeln als von Raubsauriern (Theropoden). Wie bei diesen ist die erste Zehe zwar seitlich abgespreizt, steht den anderen aber nicht gegenüber. Demnach war *Archaeopteryx* wohl nicht an ein permanentes Leben im Geäst angepasst. Auch bei der zweiten Zehe unterscheidet er sich von den heutigen Vögeln. Sie ist weit vorstreckbar wie bei den Dromaeosauriern, einer Untergruppe der Theropoden, trägt allerdings nicht die bei diesen übliche große »Killerkralle«. Zusammen mit Gemeinsamkeiten bei etlichen Schädelmerkmalen bestätigt das die Theorie, dass *Archaeopteryx* eng mit den Raubsauriern verwandt war. Die gezeigte Aufnahme entstand im UV-Licht, in dem erhaltene Reste organischer Substanz weiß fluoreszieren, während der Stein blau erscheint; eingeklinkt ist ein normales Foto.

GERALD MAYR, FORSCHUNGSINSTITUT SENCKENBERG, FRANKFURT

KOSMISCHE STRAHLEN

Der Super-Teilchenfänger in der Pampa

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Mitte November wurde in Argentinien das größte Teleskop der Erde eingeweiht: das Pierre-Auger-Observatorium. Es soll ultrahochenergetische Teilchen einfangen – und eines der größten Rätsel der Teilchenastrophysik lösen.

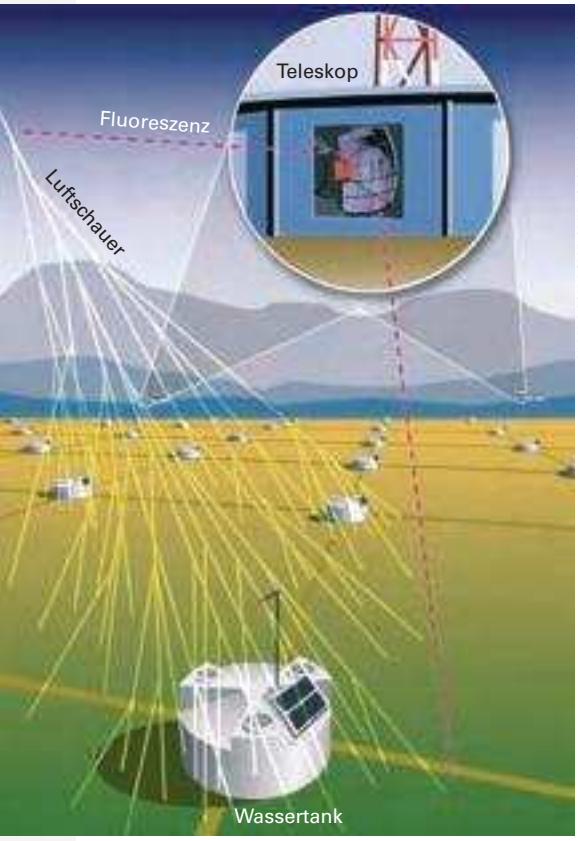
Von Reinhard Breuer

Kann das sein? Ich stehe, wie mir Projektwissenschaftler sagen, mitten im »größten Teleskop der Erde« – und ich sehe nichts davon. Um mich nur das hohe Buschgewächs der argentinischen Pampa, sandige Schotterpisten und die schneebedeckten Berge der Anden.

Willkommen im »südlichen Pierre-Auger-Observatorium«. Über tausend Kilometer westlich von Buenos Aires, unweit des Städtchens Malargüe in der Pampa Amarilla, einer Hochebene in 1400 Meter Höhe, überdeckt die Beobachtungsstation ein Gebiet von über 3000 Quadratkilometern, eine Fläche so groß wie das Saarland. Hier findet sie also statt, die Jagd auf energiereiche kosmische Strahlen. Doch zu sehen ist von meinem Standpunkt aus gerade mal ein merkwürdiger Wassertank, bestückt mit einer Solarzelle, GPS- und Radioantenne. »Pepe« steht auf einem Schild; die Namen für diesen und weitere Tanks konnten die Schulkinder der Region bestimmen.

Doch als Tränke für die Kühe, die uns aus der Ferne neugierig beäugen, taugt der 12-Tonner nicht. Sein hochgereinigtes Wasser fängt zusammen mit dem von 1600 weiteren Tanks, die im Abstand von 1,5 Kilometern wie in einem Gittermuster aufgestellt werden sollen, kosmische Strahlen der allerhöchsten Energien ein, die vom Kosmos überhaupt erzeugt werden. Zur Installation des tausendsten Tanks trafen sich kürzlich die über 200 Projektwissenschaftler aus 16 Ländern, darunter Deutschland, das mit 60 Forschern nach den USA das größte nationale Kontingent stellt.

Bei kosmischen Strahlen, so die etwas schiefe Nomenklatur der Astrophysiker, handelt es sich primär um Partikel: Protonen, Heliumkerne oder etwas schwerere Atomkerne. Entdeckt hat sie 1912 der Österreicher Victor Hess. Bei seinen kühnen Ballonflügen fiel ihm auf, dass die Luft in vier bis fünf Kilometer Höhe stark ionisiert ist. Er führte dies richtig auf Kollisionen der Luftmoleküle mit kosmischen Teilchen zurück. Wenn diese nach ihrer Irrfahrt durchs All auf die Atmosphäre treffen, lösen sie beim Zusammenstoß mit Luftmolekülen jeweils eine Mikroexplosion aus. Wie in einer Lawine rast dann ein so genannter Luftschauer zur Erde.



BILDER DIESER DOPPELSEITE: FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Signale aus dem All: Wenn kosmische Teilchen mit Luftmolekülen kollidieren, lösen sie einen »Luftschauer« von Sekundärteilchen aus. Diese schlagen dann am Boden in die Wassertanks ein. Gleichzeitig emittieren angeregte Luftmoleküle Fluoreszenzlicht, das in klaren Nächten von optischen Teleskopen (oben) aufgefangen wird.

Wie frisch gelandete Ufos wirken die Wassertanks in der Pampa. Über eine Antenne senden sie ihre Daten an die Radiostation am Horizont, in der auch Teleskope untergebracht sind.

Extragalaktische Boten

»Die meisten Luftschauer werden durch Teilchen aus unserer Milchstraße ausgelöst«, erklärt mir Ralph Engel vom Forschungszentrum Karlsruhe (FZK). »Die interessieren uns nicht, wir nehmen sie nur zur Eichung, also um zu sehen, dass unser Experiment gut funktioniert.« Die Teilchenforscher in der Pampa lauern auf die viel höher energetischen Teilchen von außerhalb der Galaxis. Sie messen ihre Energie in »Elektronenvolt« (eV) und peilen auf Teilchen, die etwa 10^{18} bis mehr als 10^{20} eV mitbringen. Das ist hundert Millionen Mal mehr als alles, was selbst der Large Hadron Collider am Cern liefern wird. Zum Vergleich: Die Sonne schickt uns Teilchen mit rund 10^{9} eV, irdische Luftmoleküle bewegen sich lediglich mit einer Energie von 0,02 eV.

Das Interesse an kosmischen Ultrahochenergien ist vor allem astronomisch motiviert. Als elektrisch geladene Teil-

chen werden kosmische Strahlen ständig von galaktischen und intergalaktischen Magnetfeldern abgelenkt, sodass die Quelle unsichtbar bleibt. Engel: »Das ist, wie wenn Licht von hinten auf Nebel fällt, man sieht nicht, wo die Lampe ist.« Erst oberhalb von 10^{19} eV werden die Teilchen zu Geschossen, die fast mit Lichtgeschwindigkeit geradlinig durchs All rasen. »In diesem Energiefenster wird das Universum für die Teilchen durchsichtig und wir erhalten Informationen über den Entstehungsort.«

Schon ihre Energieverteilung versetzt die Forscher in permanente Grübelzustände. Hans Blümer erläutert eines der Grundprobleme: »Über 14 Dekaden in der Teilchenenergie fällt die Intensität um mehr als 30 Größenordnungen ab.« Der Sprecher der deutschen Auger-Forscher ist seit knapp einem Jahrzehnt beim 50 Millionen Dollar teuren Auger-Observatorium mit dabei. Etwa 15 bis 20 Jahre lang soll es laufen, berichtet er. »Hoffentlich können wir auch bald das entsprechende Teleskop für die Nordhalbkugel in Colorado aufbauen. Leider hapert es bisher an seiner Finanzierung.«

Noch ist auch Auger-Süd nicht komplett, aber seit über einem Jahr wird bereits beobachtet. In dem Bereich ultrahoher Energien hat auch die Natur so ihre Mühen. Bei 10^{12} eV trifft pro Sekunde ein Teilchen auf den Quadratmeter. Bei 10^{20} eV ist eher Warten angesagt: Nur noch mit einem Ereignis pro Quadratkilometer rechnen die Forscher dann – pro Jahrhundert! »Damit war klar, wir brauchten große Detektorflächen, um dem Rätsel dieser Teilchen auf die Spur zu kommen«, sagt Hans Blümer. Das bislang größte Detektorarray steht in Japan und umspannte gerade hundert Quadratkilometer. »Wir brauchen aber nicht nur mehr, sondern auch weit präzisere Daten, um etwas über den Ursprung aussagen zu können«, ergänzt Ralph Engel.

So setzten die Auger-Forscher seit 1998 ein gewaltiges Programm in Gang, um auch die Beobachtungsgenauigkeit auf die Spitze zu treiben. An vier Stationen rund um die 1600 Tanks wurden auf Hügeln Lichtteleskope mit je sechs Spiegeln installiert. Sie registrieren die kurzen UV-Pulse der Fluoreszenzstrahlung von Stickstoffmolekülen, die die Luftschauer wenige Mikrosekunden lang auslösen. »Die ist leider so schwach wie eine 30-Watt-Birne in 30 Kilometer Entfernung, sodass das nur in klaren, mondlosen Nächten klappt«, erläutert Engel.

Die Flöhe rasieren

Da die Teilchenfront lichtschnell zu Boden rast, sehen die Teleskope das Licht sogar erst Sekundenbruchteile später als die Tanks. Typische Luftschauer treffen auf 10 bis 15 dieser Wasserbehälter, lösen darin Tscherenkowstrahlung aus, die von je drei Photoverstärkern aufgefangen wird. »Mit dem Pierre-Auger-Observatorium sind weltweit erstmals beide Methoden zugleich im Einsatz«, berichtet Blümer. »Mit der Simultanbeobachtung erhalten wir die besten Daten über Energie und Richtung des Primärteilchens.«

Um ja jede Fehlerquelle auszuschalten, wird der Luftraum über dem Array laufend mit Wetterballons und Laserstrahlen kontrolliert. Sogar eine Überwachung des Luftvolumens mit kleinen Radioteleskopen ist geplant. »Wenn man genauer werden will als ein Faktor zwei«, sagt FZK-Forscher Hartmut Gemmeke, der die Elektronik der Fluoreszenz-Detektoren baute, »dann muss man beginnen, die Flöhe zu rasieren.«

Und die werden über die kosmischen Strahlen noch lange husten, denn auch die wenigen Teilchen, die »Auger« bisher einfangen konnte, lieferten noch keine unmittelbare Erklärung, wo die Teilchen entstanden und wie sie zu uns gelangten. Denn problematisch ist schon, dass sie auf ihrem weiten Weg zwar unbehelligt durch Magnetfelder reisen, aber mit den Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung interagieren. Diese Reliktstrahlung des Urknalls »bremst wie ein zäher Brei die energiereichsten kosmischen Teilchen aus, und zwar innerhalb von hundert Millionen Lichtjahren«, sagt Engel. »Das klingt nach viel, ist aber wenig, wenn man kosmische Maßstäbe anlegt.«

Irgendwo innerhalb dieser Distanz müssten demnach einige der mächtigsten Energiewerfer des Universums sitzen. »Nur haben wir sie noch nicht entdeckt.« Merkwürdigerweise scheint gera- ▷

Zarte Lichtblitze von Fluoreszenzlicht empfangen 24 dieser Spiegel, wenn Luftschauer das Sichtfeld über dem Observatorium durchqueren.

▷ de das Zentrum der Milchstraße, von wo sich manche Theoretiker besonders kräftige Teilchenstürme erwarteten und das mit dem Auger-Teleskop in Argentinien gut zu sehen sein sollte, völlig unauffällig. »Vielleicht hat das Schwarze Loch im galaktischen Zentrum ja dort schon längst alles leer gefegt«, spekuliert Engel.

In der weiteren kosmischen Umgebung finden sich vor allem die wenigen Galaxien der »Lokalen Gruppe« (inklusive unserem eigenen Milchstraßensystem) sowie der Virgohaufen mit seinen etwa dreitausend Galaxien. Diese ungleiche Ansammlungen von Materie in der näheren Umgebung wirft noch ein weiteres Dilemma auf: »Wenn man annimmt, dass die Quellen entsprechend der Materie verteilt sind, wäre eine Anisotropie zu erwarten.« Alle bisher beobachteten kosmischen Teilchen scheinen jedoch völlig gleichmäßig über die Himmelskugel verteilt zu sein. »Tatsächlich ist diese Isotropie eines unserer größten Probleme«, stöhnt der Theoretiker. »Aber ein Großteil der sichtbaren Massen liegt außerhalb des Gesichtskreises von Auger-Süd und kann nur mit einem Experiment auf der Nordhalbkugel gesehen werden. Daher brauchen wir unbedingt Auger-Nord«, sagt Hartmut Gemmeke.

Kein Wunder, dass Theoretiker seit Enrico Fermi im Jahr 1949 die wildesten Modelle erfinden, um dieses Paradox zu erklären. Die Liste ist lang und zeigt dadurch, dass die Lösung noch fern ist: Düsenstrahlen (»Jets«) in aktiven galaktischen Zentralregionen, kollidierende Schwarze Löcher, Hypernovae, Obwohl die Mehrzahl der Forscher derzeit galaktische Jets favorisiert, in denen herumwirbelnde Magnetfelder und Stoßwellen die Teilchen beschleunigen, werden auch Gammastrahlenausbrüche, sogar kollidierende Galaxien zu Hilfe gebeten. Doch »kein Modell«, so Engel, »kann bisher alles konsistent erklären.«

Wer will, kann sich übrigens am Auger-Observatorium direkt beteiligen – mit einem guten Namen! Nachdem Schulkinder von Malargüe 800 Tanks getauft haben, gehen ihnen jetzt die Namen aus. Vorschläge können per E-Mail eingereicht werden (bitte nur auf Englisch!) an Greg Snow (gsnow@unlhep.unl.edu). Einzige Bedingung: Man muss den Namensvorschlag kurz begründen.

Reinhard Breuer ist ausgebildeter Astrophysiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

MIKROBIOLOGIE

Auf der Fährte der Lepra

Selbst die früher übliche gnadenlose Isolation von Leprakranken konnte nicht verhindern, dass die gefürchtete Seuche dem Menschen über den gesamten Erdball folgte. Auf welchen Wegen dies geschah, deckt jetzt eine genetische Untersuchung des Aussatzerregers auf.

Von Petra Jacoby

Unter den nicht tödlichen Krankheiten ist wohl keine so gefürchtet wie die Lepra. Noch bis ins letzte Jahrhundert hinein bedeutete die Diagnose unweigerlich ein Leben im sozialen Abseits. Im Mittelalter, als immer wieder heftige Lepraepidemien Europa heimsuchten, legte die Kirche rigorose Verhaltensregeln für Erkrankte fest. Die Aussätzigen mussten ihr Dasein abgeschottet in Siechenhäusern fristen, die sie nur zum Betteln verlassen durften. Dazu erhielten sie einen speziellen Kapuzenmantel und Handschuhe, um ihre Verstümmelungen zu bedecken, sowie eine Klapper, damit sie auf sich aufmerksam machen konnten; denn auch das Ansprechen von Gesunden war ihnen untersagt.

Von Alexander dem Großen aus Indien eingeschleppt?

Dabei ist die Seuche entgegen früheren Befürchtungen gar nicht besonders ansteckend: Nur etwa fünf bis zehn Prozent der Bevölkerung sind anfällig für den Erreger *Mycobacterium leprae*. Allerdings lösten die entstellenden Krankheitssymptome wie eine mit Knoten übersäte Gesichtshaut, verkrümmte Hände und langsam abfaulende Gliedmaßen Angst und Schrecken aus – und tun dies in Regionen mit schlechtem Bildungsstand immer noch. Dabei ist der Aussatz mit einer Kombinationstherapie aus mehreren Antibiotika inzwischen gut heilbar. Die WHO hatte sich deshalb für 2005 seine weltweite Ausrottung zum Ziel gesetzt, scheiterte jedoch: Weiterhin treten jährlich über 500 000 neue Fälle auf, vor allem in Indien, Brasilien und Afrika.

Aussatz ist eine der ältesten dokumentierten Krankheiten. Schon 600 v. Chr. erwähnen heilige indische Schriften typische Anzeichen wie Gefühllosigkeit in Fingern und Zehen, und ägyptische Skelette aus dem zweiten vorchristlichen Jahrhundert weisen eindeutige Leprasymptome auf. Wo aber liegt der Ursprung der Seuche, und wie verbreitete sie sich über die gesamte Welt?

Einer gängigen Theorie zufolge sollen die Soldaten von Alexander dem Großen den Aussatzerreger bei ihrem Indienfeldzug (327–325 v. Chr.) ins Mittelmeergebiet eingeschleppt haben, von wo das Bakterium später nach Europa gelangte. Die Idee klingt plausibel, aber stimmt sie auch? Stewart Cole vom Pariser Institut Pasteur ist dieser Frage nun zusammen mit einem internationalen Wissenschaftlerteam mit Hilfe moderner genetischer Methoden nachgegangen *(Science, Bd. 308, S. 1040)*.

Die Strategie der Forscher leuchtet auch Laien unmittelbar ein: Um die Wanderpfade der Lepra nachzuzeichnen, wollten sie das Erbgut von Proben des Aussatzerregers vergleichen, die aus unterschiedlichen Regionen der Welt stammten. Als Vergleichsobjekt sollte ein gemeinsames genetisches Merkmal dienen, das bei den verschiedenen Bakterienstämmen leichte Abweichungen zeigt und so deren Verwandtschaftsverhältnisse widerspiegelt.

Zunächst wählten Cole und seine Kollegen – analog zu der Vorgehensweise bei Vaterschaftstests – eine so genannte repetitive Sequenz: eine Abfolge aus wenigen Basen (quasi den Buchstaben des genetischen Alphabets), die sich vielfach wiederholt. Eine solche Einheit aus gleichsam gestotterten Silben ist etwa das so genannte Miru-Element *(mycobacterial interspersed repetitive unit)*. Obwohl seine Funktion ebenso im Dunkeln liegt wie die der entsprechenden Sequenzen beim Menschen, kommt es bei allen Mykobakterien vor und ist an mehreren Stellen in deren Erbgut eingestreut. Mit ihm lassen sich beispielsweise Stämme des nah mit *M. leprae* verwandten Tuberkelbazillus sehr gut verschiedenen Typen

GEMEINSAM FÜR AFRIKA / URSULA MEISSNER

Lepra war vor allem deswegen so gefürchtet – und ist es in der Dritten Welt noch heute –, weil sie die Erkrankten grausam entstellt.

zuordnen. Diese unterscheiden sich sowohl in der Anzahl der Miru-Kopien pro Genom als auch darin, wie oft sich die Sequenz in jedem Element wiederholt. Durch statistische Auswertung der Merkmalskombinationen erhält man schließlich ein eindeutiges Verwandtschaftsmuster für die unterschiedlichen Stämme des Erregers der Schwindsucht.

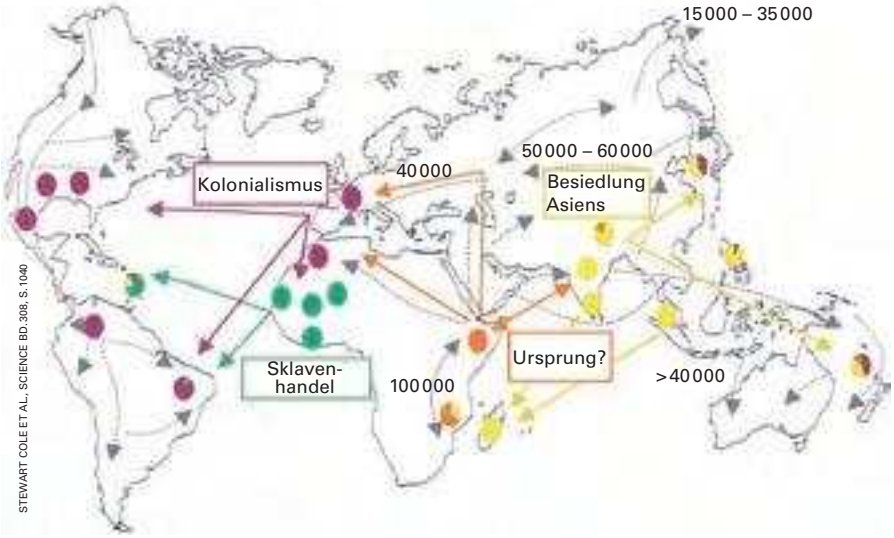
Nicht so beim Leprakeim. Überraschenderweise waren sämtliche sieben Stämme von *M. leprae*, die Cole und seine Kollegen untersuchten, absolut einheitlich in Bezug auf ihr Miru-Element – weder Abweichungen in der Häufigkeit noch Variationen bei der Anzahl der Sequenzwiederholungen traten auf.

Deshalb verdichteten die Wissenschaftler das Fahndungsraster und wählten einen feineren Merkmalstyp, bei dem sie sich eine größere Variabilität erhofften: Sie untersuchten so genannte Einzelnucleotidpolymorphismen, kurz SNPs (nach englisch *single nucleotide polymorphisms*). Das sind Stellen in der DNA, an denen bei den Angehörigen einer Art mit einer Häufigkeit von über einem Prozent eine Punktmutation auftritt – an denen also die Base, die sich normalerweise an dieser Position befindet, gegen eine andere ausgetauscht ist. Zum Beispiel steht dann anstelle des üblichen Cytosin bei einigen Bakterien ein Thymin.

Im Allgemeinen sind solche SNPs recht häufig – im Erbgut von *M. tuberculosis* kommt ungefähr alle 3000 Basen einer vor. Als das Team um Cole die Genome von 175 Leprabakterien-Proben aus 21 Ländern Asiens, Afrikas, Amerikas, Europas und der Pazifikregion nach ihnen durchforstete, musste es allerdings feststellen, dass der Lepraerreger auch in diesem Fall äußerst wandlungsträge ist: Nur etwa alle 28 400 Basen tritt ein SNP auf. Immerhin kamen im untersuchten, ungefähr 100 000 Basen langen DNA-Stück dadurch insgesamt drei vor. Beim ersten ist manchmal ein Cytosin (C) durch ein Thymin (T), beim zweiten ein Thymin durch ein Guanin (G) ersetzt. Am dritten SNP befindet sich mit gleicher Häufigkeit entweder ein Adenin (A) oder Cytosin.

Als Nächstes machten sich Stewart Cole und seine Kollegen daran, die 175 Bakterienisolate anhand ihrer SNP-Kombinationen in verschiedene Typen einzuteilen. Bei insgesamt drei SNP-Orten, an denen jeweils eine von zwei Basen auftreten kann, gibt es theoretisch 8 ▷

ANZEIGE



Nach neuen Genanalysen entstand die Lepra vor etwa 100000 Jahren in Äthiopien und breitete sich von dort in mehreren Wellen über den Globus aus. Die Zahlen bedeuten Jahre vor heute.

▷ (2^3) denkbare SNP-Arrangements. Nur vier davon kamen jedoch tatsächlich vor – ein weiterer Beweis dafür, wie konservativ *M. leprae* ist.

Allerdings zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen den vier SNP-Typen und der geografischen Herkunft des jeweiligen Bakterienstamms. Typ 1 mit der Kombination CGA (also mit Cytosin am ersten, Guanin am zweiten und Adenin am dritten SNP-Locus) tritt besonders häufig in Asien und im Pazifikraum auf. Typ 2 (CTA) kommt nur vereinzelt vor, beispielsweise im ostafrikanischen Äthiopien. Typ 3 (CTC) ist am stärksten in Europa, Nordafrika und Amerika vertreten. Typ 4 (TTC) schließlich findet man bevorzugt in Westafrika und der Karibik.

Per Anhalter durch die Welt

Mit diesem Verbreitungsmuster der vier SNP-Typen konnten Cole und seine Kollegen nun nachvollziehen, auf welchen Wegen der Leprakeim einst im Schlepptau seiner menschlichen Wirte über den Globus reiste. Da Typ 2 aus Äthiopien mit Abstand am seltensten auftritt, scheint er die urtümlichste Variante von *M. leprae* zu sein. Die Forscher vermuten daher, dass sich das Bakterium irgendwann vor Tausenden von Jahren entweder in Ostafrika oder im Nahen Osten zum gefährlichen Aussatzerreger entwickelt hat. Von dort aus schälen sich zunächst zwei Wanderrouten heraus. Eine führte Richtung Osten nach Asien und in den Pazifikraum – entsprechend einer Mutation beim zweiten SNP von T nach G, wodurch aus Typ 2 (CTA) der asiatisch-pazifische Typ 1 (CGA) wurde. Die andere Route verlief in westlicher Richtung nach Europa und Nordafrika; dabei mutierte Typ 2 (CTA) zu Typ 3 (CTC).

Von Europa aus gelangte das Bakterium dann weiter nach Westafrika und Amerika. Vermutlich brachten europäische Siedler den Keim mit Beginn des Kolonialismus im 15. Jahrhundert nach Westafrika; denn von Typ 3 (CTC) zu Typ 4 (TTC) ist nur eine Mutation erforderlich. Wären dagegen mit Typ 2 (CTA) infizierte Einwanderer aus Ostafrika die Überträger gewesen, hätte gleich an zwei Stellen eine Base ausgetauscht werden müssen – ein unwahrscheinlicher Vorgang.

Durch den ab dem 16. Jahrhundert von Westafrika aus betriebenen Sklavenhandel in die Neue Welt gelangte Typ 4 schließlich in die Karibik und nach Brasilien. Im übrigen Teil Amerikas dürften dagegen nur Einwanderer aus Europa den Lepraerreger eingeschleppt haben; denn insgesamt herrscht auf dem gesamten Kontinent der europäische Typ 3 vor. Die ursprünglichen Siedler, die Amerika vor 35000 bis 15000 Jahren von Asien aus über die Beringstraße erreichten, brachten den Aussatz höchstwahrscheinlich nicht mit; denn vom asiatischen Typ 1 (CGA) zum in Amerika grassierenden Typ 3 (CTC) wären wieder zwei Mutationen auf einmal nötig gewesen.

Dasselbe Argument spricht übrigens gegen die Vermutung, Alexanders Heer habe die Lepra aus Indien mitgebracht. Auch in diesem Fall hätte nämlich gleich an zwei SNP-Loci eine Mutation stattfinden müssen. Allerdings könnten sich die Soldaten auf ihrem Rückzug vom Indusgebiet im Nahen Osten mit dem dort grassierenden Typ 2 von *M. leprae* angesteckt und so den Vorläufer des europäischen Typs 3 ins Abendland eingeschleppt haben. Genausogut kommen dafür aber auch Händler, Seefahrer und andere Reisende in Frage, die aus Ostafrika oder dem Nahen Osten nach Europa zurückkehrten. Dieses Kapitel in der Geschichte der Lepra bleibt allen neuen Erkenntnissen zum Trotz also weiterhin offen für Spekulationen und Legenden.

Petra Jacoby ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Wittlich.

MEDIZIN

Vampire gegen Schlaganfall

Eine Substanz aus dem Speichel der Vampirfledermaus verspricht, Blutgerinnsel bei Patienten mit Hirninfarkt besser und schonender aufzulösen als der einzige bisher zugelassene Wirkstoff.

Von Thorsten Braun

Bei Anbruch der Dunkelheit geht sie auf die Jagd. Ihre Opfer sind Haustiere wie Rinder, Pferde und Esel. Mit messerscharfen Zähnen beißt sie sich durch deren Fell und Haut; dann leckt sie das aus der Wunde rinnende Blut. Die Rede ist von der Vampirfledermaus *Desmodus rotundus*, die in Mittel- und Südamerika vorkommt. Sie ist das einzige Säugetier, das sich ausschließlich von Blut ernährt. Und mit dieser Spezialisierung könnte sie bald helfen, Menschenleben zu retten.

Damit sich die Wunde nicht gleich wieder schließt, enthält der Speichel der kleinen Vampire nämlich eine besondere Substanz: das Enzym Desmoteplase. Es verhindert, dass sich Fibrin, der feste Ge-

rüststoff von gerinnendem Blut, bilden kann. Dank dieser Eigenschaft könnte sie Schlaganfallpatienten helfen.

Schon in den 1990er Jahren gelang es Wissenschaftlern bei Schering, Desmoteplase gentechnisch in größeren Mengen zu erzeugen. Um die Wirksamkeit der Substanz beim Menschen zu testen, führte das Pharmaunternehmen eine klinische Studie an Herzinfarktpatienten durch. Obwohl sie erfolgreich verlief, stellte der Konzern die Entwicklung des Medikaments 1999 aus strategischen Gründen ein. Offenbar sah er zu geringe Chancen, dass sich das Mittel gegen etablierte Substanzen auf diesem Gebiet durchsetzen könnte.

Düstere Bilanz

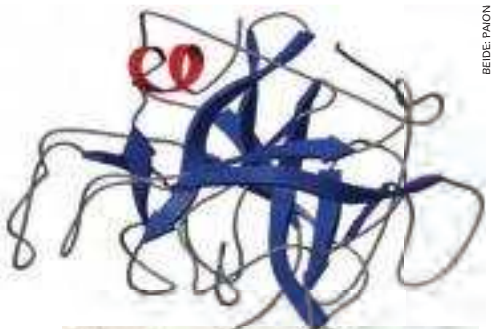
Die Aachener Biotechnologie-Firma Paion übernahm im Folgejahr die Lizenzrechte und entwickelte das Enzym für die Therapie des akuten Schlaganfalls weiter – ein Bereich, in dem bisher nur ein Medikament auf dem Markt ist. Mittlerweile befindet sich Desmoteplase in der Endphase der klinischen Prüfung, und in zwei Jahren könnte die Zulassung erfolgen.

Etwa 200 000 Menschen erleiden in Deutschland jährlich einen Schlaganfall. Auslöser ist in 85 Prozent der Fälle die Verstopfung einer oder mehrerer Adern im Gehirn durch Blutgerinnsel, in den restlichen 15 Prozent eine Blutung durch ein geplatztes Gefäß. Als Folge der Blockade stirbt meist Hirngewebe ab. Für jeden fünften Patienten verläuft die Krankheit innerhalb der ersten vier Wochen tödlich. Nur ein Drittel der überlebenden Opfer kann in ein normales Arbeitsleben zurückkehren; ein weiteres Drittel leidet an langfristigen Behinderungen wie Lähmungen oder Sprachstörungen und bleibt lebenslang auf fremde Hilfe angewiesen.

Diese düstere Bilanz hat vor allem einen Grund: Bisher bleibt den Ärzten nach Auftreten der ersten Symptome nur eine kurze Zeitspanne, um gegen einen Hirninfarkt ursächlich vorzugehen, das heißt das Blutgerinnsel medikamentös aufzulösen. Alteplase, das einzige Arzneimittel, das für diesen Zweck zugelassen ist, darf nur bis drei Stunden nach dem Schlaganfall verabreicht werden. Bei verlängerter oder späterer Anwendung bestünde ein hohes Risiko, dass zusätzliche Nervenzellen absterben und Hirnblutungen auftreten; denn das Medikament treibt Neuronen, die an Sauerstoffmangel leiden, durch Übererregung in den Tod und begünstigt die Zerstörung von Blutgefäßen im Gehirn.

In der Praxis trifft nur ein Viertel der Schlaganfallpatienten rechtzeitig im Krankenhaus ein, und nicht für alle kommt die Behandlung in Frage. Deshalb erhalten je nach Klinik nur drei bis zehn Prozent der Patienten die Gerinnsel auflösende Therapie (Thrombolyse).

Um die Behandlung zu optimieren, wurden in den vergangenen Jahren in ganz Deutschland rund 150 Schlaganfallstationen eingerichtet. Diese Stroke Units sind besser ausgestattet als herkömmliche Intensivstationen und verfügen über besonders geschultes Personal. Zudem sollen gemäß den Empfehlungen der Deutschen Schlaganfall-Gesellschaft so viele Krankenschwestern dort arbeiten, dass je eine für maximal zwei Patienten zuständig ist. Nur dadurch lasse sich eine fachgerechte Behandlung ▷



BEIDE: PAION

Der Speichel der Vampirfledermaus (unten) enthält ein Enzym namens Desmoteplase, das die Blutgerinnung verhindert. Die Molekülstruktur der Substanz ist bekannt (oben). Darin dominieren so genannte Beta-Faltblätter (blau) gegenüber nur einer Alpha-Helix (rot).

WICHTIGE ONLINE-ADRESSEN

›› Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion,
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

›› DOK –
Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

›› F.u.G. Elektronik GmbH
Hochgenaue Gleichspannungsversorgungen
Netzgeräte für Nieder- und Hochspannung
für alle Anwendungen in Forschung und Technik
www.fug-elektronik.de

›› Faszination Weltraum !
Alles über Astronomie und Raumfahrt!
www.weltraum-versand.de

›› Foto-Scout-Zuse
Die lernende Bildsuchmaschine der
besonderen Art zum Sichten, Sortieren und
Wiederfinden von Fotos auf Ihrem PC
www.foto-scout-zuse.com

›› Kernmechanik –
die neue Quantenphysik
Von Kernspin bis Kosmologie
www.kernmechanik.de

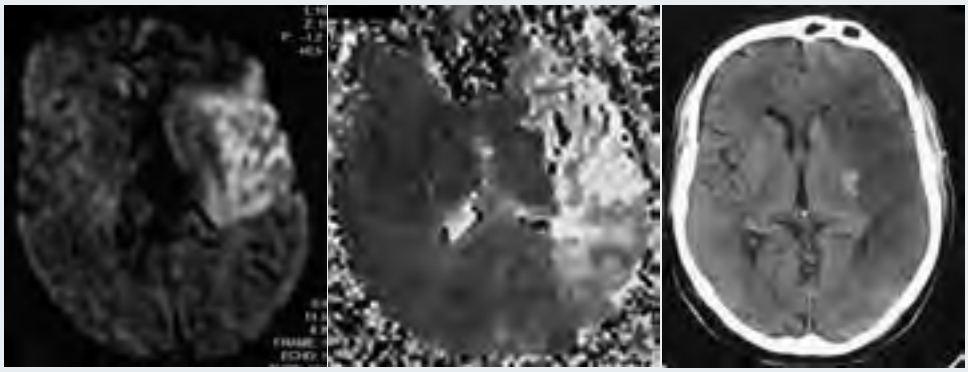
›› Patentanwälte Charrier Rapp & Liebau
Beratung und Vertretung in Patent-,
Muster- und Markenangelegenheiten,
Lizenzen und Patentrecherchen
www.charrier.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de

Chancen einer Thrombolyse

Bei den meisten Schlaganfällen ist die Blutzufuhr zu einem Hirnbereich blockiert, sodass das Gewebe dort abstirbt. Zunächst werden dabei nur in einer Kernzone die Nervenzellen irreversibel geschädigt. Diese Region erscheint in dem diffusionsgewichteten Magnetresonanzbild (links) als helles Areal auf der rechten Seite. In der perfusionsgewichteten Aufnahme (Mitte) lassen sich dagegen auch benachbarte Gebiete erkennen, die zwar beeinträchtigt, aber noch schwach durchblutet sind. Diese so genannte Penumbra kann durch eine frühzeitige Behandlung mit Gerinnsel auflösenden Medikamenten gerettet werden. Im gezeigten Beispiel ist das mit dem herkömmlichen Mittel Alteplase nicht gelungen: Nach 24 Stunden umfasste der abgestorbene Bereich, der auf dem computertomografischen Bild (rechts) dunkel erscheint, auch die Penumbra.



▷ gewährleisten. »Auf einer normalen Station muss eine Krankenschwester nachts bis zu 36 Patienten betreuen«, berichtet Karl Max Einhäupl, Direktor der Klinik für Neurologie an der Berliner Charité.

Für eine verbesserte Therapie bedarf es aber auch neuer Medikamente. Desmoteplase scheint viel versprechend, weil es gegenüber Alteplase mehrere Vorteile hat. Vor allem muss es nicht innerhalb der ersten drei Stunden nach dem Schlaganfall injiziert werden, sondern bietet ein größeres Zeitfenster. Das zeigen Ergebnisse einer klinischen Phase-II-Studie, die kürzlich in der Fachzeitschrift »Stroke« veröffentlicht wurden *(Bd. 36, S. 66)*. An dem Versuch nahmen 104 Patienten teil, die innerhalb von drei bis neun Stunden nach Beginn der Symptome mit Desmoteplase oder einem Scheinmedikament behandelt wurden.

Eindrucksvolle Behandlungserfolge

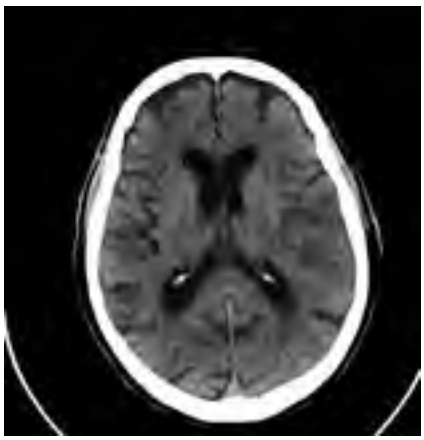
Je nach Dosierung sorgte die Substanz bei bis zu 71,4 Prozent der Probanden dafür, dass das gesamte Gehirn wieder durchblutet wurde; unter Placebo betrug dieser Anteil nur 18 Prozent. Neunzig Tage später hatte sich bei 60 Prozent der mit Desmoteplase behandelten Patienten der Zustand deutlich verbessert – in der Kontrollgruppe nur bei 22 Prozent.

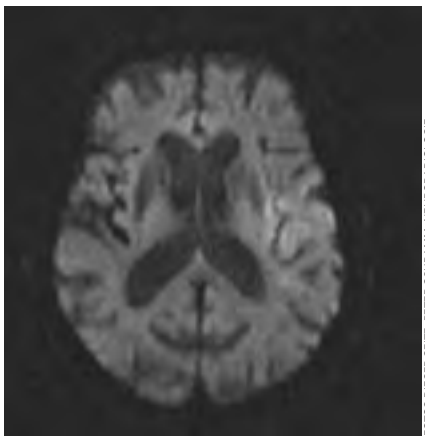
Der mögliche Grund, warum das Fledermausenzym noch relativ lange nach dem Schlaganfall einsetzbar ist, zeigte sich in Tierversuchen: Im Gegensatz zu Alteplase lässt es die geschädigten Nervenzellen offenbar nicht absterben. »Es gibt immer mehr Hinweise darauf, dass die toxischen Eigenschaften von Alteplase einer bestimmten molekularen Struktur zuzuordnen sind, die bei Desmoteplase nicht vorhanden ist«, sagt Paion-Geschäftsführer Wolfgang Söhngen.

Die hohe Wirksamkeit der Substanz in der Studie könnte freilich auch daran liegen, dass die Patienten anhand verbesserter bildgebender Verfahren vorselektiert wurden. Teilnehmen durften nur Schlaganfallopfer, bei denen die Behandlung aussichtsreich schien. Indiz dafür war eine so genannte Penumbra: ein Bereich um das Zentrum des Infarkts, in dem das Gewebe noch leicht durchblutet ist. Wird das Gerinnsel rasch wieder aufgelöst, dann lässt sich dieses Areal meist retten.

Um die Penumbra sichtbar zu machen, bedarf es freilich moderner Kernspintomografen, mit denen noch längst nicht jede Schlaganfallstation ausgerüstet ist. Die üblichen Röntgengeräte können nur den Unterschied zwischen Hirninfarkt und Hirnblutung zeigen. Ein weiteres Problem ist, dass die kaum transportfähigen Schlaganfallpatienten für die Bildgebung erst einmal in die Radiologie gebracht werden müssen, ehe dann in der Stroke Unit die eigentliche Behandlung stattfinden kann.

Das Centrum für Schlaganfall-Forschung Berlin (CSB), welches im Juni des vergangenen Jahres gegründet wurde und seinen Hauptsitz in der Charité hat, möchte diesen Umweg nun vermeiden. Hier soll die Stroke Unit demnächst einen eigenen Hochfeld-Kernspintomo-





Bei Behandlung mit Desmoteplase ließ sich in vielen Fällen die Penumbra retten, obwohl die Patienten erst drei bis zwölf Stunden nach dem Schlaganfall das Medikament erhielten. Im gezeigten Fall umfasst der nach einem Tag abgestorbene Bereich auf dem computertomografischen Bild (links) nur das Areal in der diffusionsgewichteten Magnetresonanzaufnahme zu Beginn der Behandlung (rechts), in dem die Neuronen von Beginn an irreversibel geschädigt waren.

FOTOS DIESER SEITE: PETER SCHRAMM, NEURORADIOLOGIE, UNIVERSITÄTSKLINIK HEIDELBERG

grafen erhalten. »Das wird weltweit der einzige Ort sein, an dem die Bilder direkt in der Schlaganfallstation aufgenommen werden«, sagt der Neurologe Ulrich Dirnagl, der zusammen mit Einhäupl und Arno Villringer das CSB gegründet hat.

Das neue Zentrum will aber nicht nur Therapie anbieten, sondern auch Forschung betreiben. Die Ärzte haben vor, zusammen mit Pharmaunternehmen und Herstellern von Medizingeräten neue diagnostische und therapeutische Verfahren zu entwickeln.

Dirnagl will zudem die Infrastruktur der Schlaganfalltherapie ausbauen und das Personal von Rettungswagen schulen: »Notärzte und Sanitäter werden von uns gezielt für ihren Einsatz trainiert, damit sie Schlaganfälle rasch erkennen und die Patienten sofort in eine Stroke Unit bringen.« Wenn all diese Verbesserungen umgesetzt sind und die Desmoteplase hält, was sie verspricht, sollte der Hirninfarkt viel von seinem Schrecken verlieren.

Thorsten Braun ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

BIOPHYSIK

Der Flug des Kolibris

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Mit Olivenöl und Laserstrahlen haben Wissenschaftler herausgefunden, wie die Nektar saugenden Vögel es schaffen, in der Luft stehen zu bleiben.

Von Stefan Maier

Kolibris sind wahre Flugkünstler. Im Unterschied zu anderen Vögeln können die zierlichen Winzlinge nicht nur vorwärts, sondern auch rückwärts und seitwärts fliegen sowie in der Luft stehen bleiben, um Nektar aus den Blütenkelchen tropischer Pflanzen zu trinken.

Im Lauf der Zeit haben Biologen erstaunliche Dinge über die Luftakrobaten herausgefunden. So machen Kolibris pro Minute 250 Atemzüge, während ihr Herz 400- bis 500-mal schlägt. Außerdem schaffen sie bis zu 80 Flügelschläge in der Sekunde.

Doch diese sportliche Höchstleistung allein erklärt noch nicht, wieso die Nektartrinker schwebend an einem Ort verharren können. Einer weit verbreiteten Theorie zufolge bewegen sie ihre Flügel dazu ähnlich wie Insekten. Letztere gewinnen – anders als die Vögel – den erforderlichen Auftrieb zu gleichen Teilen aus dem Abwärts- wie dem Aufwärtsschlag. Nach dem bloßen Augenschein könnte dies auch für Kolibris gelten; denn sie ähneln, wenn sie von Blüte zu Blüte schwirren, eher großen Insekten als Vögeln.

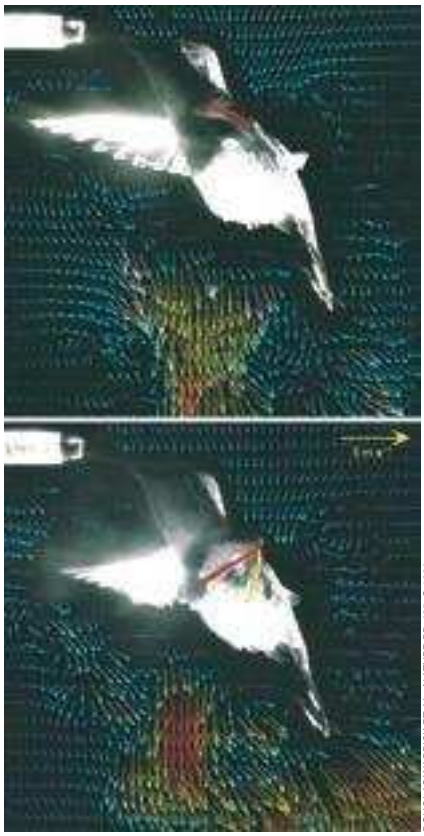
Forscher um Douglas Warrick von der Oregon State University in Corvallis wollten es nun genau wissen. Dazu ersannen sie ein Verfahren, die Luftströmungen um den schwebenden Vogel zu messen *(Nature, Bd. 435, S. 1094)*. Zunächst lockten sie einen Zimtkolibri durch eine Spritze an, die mit Zuckerwasser gefüllt war. Sobald das Tier zu trinken begann, beleuchteten sie es mit einem schwachen Laserstrahl und versprühten in seiner Umgebung mit einem Zerstäuber winzig kleine Öltröpfchen.

Diese wurden von den Luftbewegungen mitgerissen, die der Kolibri beim Schwirren erzeugte, und folgten so den Strömungslinien. Das an den Tröpfchen gestreute Laserlicht machte den Vorgang sichtbar und wurde per Videokamera aufgezeichnet. Den Rest erledigte ein Computerprogramm, das aus den aufgenommenen Sequenzen ein Strömungsprofil berechnete. Diesem Vektordiagramm ist nicht nur die Richtung, sondern auch die Geschwindigkeit der Luftbewegungen in der Umgebung der Flügel zu entnehmen.

Das Ergebnis der Messung zeigt, dass es keine vergeudete Mühe war, dem Problem genauer nachzugehen. Wie sich herausstellte, stimmt die bisherige Theorie nämlich nur zum Teil. Tatsächlich steuert die Aufwärtsbewegung des Flügels nicht die Hälfte, sondern nur etwa ein Viertel zum Auftrieb bei. Der Kolibri benutzt demnach beim Schweben eine Art Zwittertechnik, die Elemente des Vogel- und Insektenflugs kombiniert. Dabei kommen ihm anatomische Besonderheiten zugute. Zum Beispiel haben Kolibris acht Rippenpaare statt sechs wie normale Vögel. Dies ermöglicht zusammen mit weiteren feinen Unterschieden die komplizierte Dynamik ihres Schwebens.

Zwar haben sich die Nektarnascher bei der Anpassung an ihre Nahrungsquelle der Flugtechnik der Insekten angenähert. Doch völlig übernommen haben sie den fremden Stil nicht. Die jüngsten Ergebnisse von Warrick und seinen Mitarbeitern belegen: Trotz aller Anpassung können die grazilen Blütenschwirrer ihre Abkunft von den Vögeln nicht verleugnen.

Stefan Maier ist Professor für Physik an der Universität Bath (Großbritannien).



DOUGLAS WARRICK ET AL., NATURE BD. 435, S. 1094

Die Luftströmung um den Flügel des schwirrenden Kolibris ließ sich mit zerstäubtem Öl und Laserbeleuchtung sichtbar machen. Demnach entsteht sowohl beim Abwärtsschlag (oben) wie bei der Aufwärtsbewegung mit umgeklapptem Flügel (unten) ein Auftrieb – Letzterer allerdings schwächer. Eine rote Linie zeigt die Orientierung der äußeren und eine gelbe die der inneren Flügelkante.

Springers
EINWÜRFE

von Michael Springer

Holland, die Hydrometropole

Ein ganzes Land sticht in See.

Während Politiker und Gelehrte noch überlegen, ob sie den Klimawandel als Tatsache betrachten sollen oder nur als vage Möglichkeit, verplant ein kleines Land bereits Millionen Euro dafür, sich für die kommenden Jahrzehnte »klimafest« zu machen.

Die Niederlande liegen, wie der Name sagt, tief – zu 60 Prozent sogar unter dem Meeresspiegel. Durch Deiche dem Meer mühsam Land abzutrotzen war schon für Goethes Faust am Ende das Paradigma sinnvoller Tätigkeit: »Im Innern hier ein paradiesisch Land / Da rase draußen Flut bis auf zum Rand / Und wie sie nascht gewaltsam einzuschießen / Gemeindrang eilt die Lücke zu verschließen.«

Doch nicht nur das Meer droht »gewaltsam einzuschießen« – wie zuletzt 1953 geschehen, als die salzige Flut 2000 Menschenleben und umgerechnet rund eine Milliarde Euro Verluste forderte; dagegen schützt das Land sich seither mit einem ausgeklügelten Deichsystem für 13 Milliarden Euro. Hinzu kommt die Überschwemmungsgefahr durch die Flüsse Rhein, Maas und Schelde, die in den Wintern 1993 und 1995 um ein Haar über die Deiche traten.

Eine wassergeprüfte Nation wie diese wartet nicht tatenlos ab, ob die Prognosen der Klimaforscher sich bestätigen: bis 2100 ein Anstieg des Meeresspiegels zwischen 20 und 110 Zentimetern sowie gut zehn Prozent mehr Niederschlag im Winter. Die holländische Regierung verfolgt seit einigen Jahren eine »weiche« Anpassung an den Klimawandel: Statt immer höhere Deiche zu bauen, sollen gelegentliche Überflutungen zugelassen und in speziell dafür vorgesehenen Gebieten aufgefangen werden. Das hat seinen Preis, ist aber nach Überzeugung holländischer Experten immer noch viel billiger als stures Wettrüsten gegen steigende Pegel oder gar passives Erwarten möglicher Katastrophen.

Die Devise »Mit Wasser leben« hat etwas von der Eleganz fernöstlicher Kampftechnik: Der Ansturm der Fluten stößt nicht auf den harten Widerstand einer Deichbarriere, hinter der die Menschen hoffen, dass sie hält, sondern er läuft ins Leere. Bauern, die ihr Land als Überschwemmungsgebiet zur Verfügung stellen, werden vom Staat entschädigt. Das zunächst unwillkommene Wasser kann – sofern es aus Flüssen stammt – als Reservoir für die trockenen Sommer dienen, deren Häufigkeit mit dem Klimawandel vermutlich zunehmen wird; der Sommer 2003 – der heißeste in Europa seit 500 Jahren – war vielleicht ein Vorbote.

Geradezu futuristisch und doch ganz ernst gemeint ist der Vorschlag niederländischer Planer, der Überschwemmungsgefahr durch schwimmende Megastädte zu begegnen. Solche Hydrometropolen wären großflächige, von Teichen umgebene und teilweise auf Seen verankerte Konglomerate von Wohngebieten, Fabriken und landwirtschaftlichen Betrieben.

Nutzpflanzen wie die berühmte Hollandtomate brauchen bekanntlich viel Wasser. Schwimmende Treibhäuser sind als Pilotprojekt bereits zu besichtigen. Mit im Wasser treibenden Treibhäusern dem Treibhauseffekt ein Schnippchen schlagen – darauf können nur Niederländer kommen. Wenn man ihr Motto »Mit Wasser leben« konsequent und global zu Ende denkt – wie im Film »Waterworld«, wo nach dem Abschmelzen aller Gletscher und Polkappen die ganze Erde überflutet ist –, müssten eines Tages große Teile der Menschheit in Hydrometropolen übersiedeln. Ob diese Wasserwelt einen neuen Menschentyp hervorbringt, wie ihn im Film Kevin Costner darstellt? Den schwimmenden Holländer? Einen Rudi Carell mit Kiemen hinter den Ohren?

Michael Springer

NASA / ESA / STSCI, STEVEN BECKWITH

Galaktische Wellen

Die prachtvollen Formen der Galaxien entstehen durch komplexes Wechselspiel zwischen den Umlaufbahnen der Sterne und dem interstellaren Gas.

Von Françoise Combes

Die ästhetische Eleganz einer Spiralgalaxie gehört zu dem Schönsten, was die Astronomie zu bieten hat. Ein klassisches Beispiel ist M 51 im Sternbild Jagdhunde (Foto links): Diese Galaxie ähnelt einem gigantischen Wirbel, weshalb Astronomen ihr neben der nüchternen Katalognummer auch einen Eigennamen verpasst haben – »Whirlpool«. Ihre hellsten Sterne reihen sich entlang der ausgeprägten Spiralarme auf wie Perlen an einer Schnur. Dunkle Staubschwaden, die neben diesen Lichterketten verlaufen, verraten die Anwesenheit interstellarer Materie, aus der Sterne entstehen. In M 51 wie auch in vielen anderen Galaxien setzen die Spiralarme an einem zentralen Ring aus Sternen an. In den meisten Sternsystemen beginnen die Spiralarme jedoch an einer balkenförmigen Struktur. Eine solche Balkenspirale ähnelt einem rotierenden Rasensprenger, bei dem das Wasser zunächst durch ein gerades Rohr fließt, bevor es dann im rechten Winkel dazu ausströmt.

Viele halten unser Milchstraßensystem – die Galaxis – für eine reine Spiralgalaxie, doch tatsächlich handelt es sich um eine Balkenspirale. Erste indirekte Hinweise darauf fanden Astronomen schon 1975: Sterne und Gas in der Mitte der Galaxis folgen nicht den Bahnen, die zu erwarten wären, wenn sich die Spiralstruktur bis ins Zentrum fortsetzte. Jüngste Himmelsdurchmusterungen im infraroten Licht, das auch die Staubwolken zu durchdringen vermag, die uns im Sichtbaren den Blick auf den galaktischen Kern verwehren, zeigen den Balken direkt und konnten so alle verbliebenen Zweifel zerstreuen.

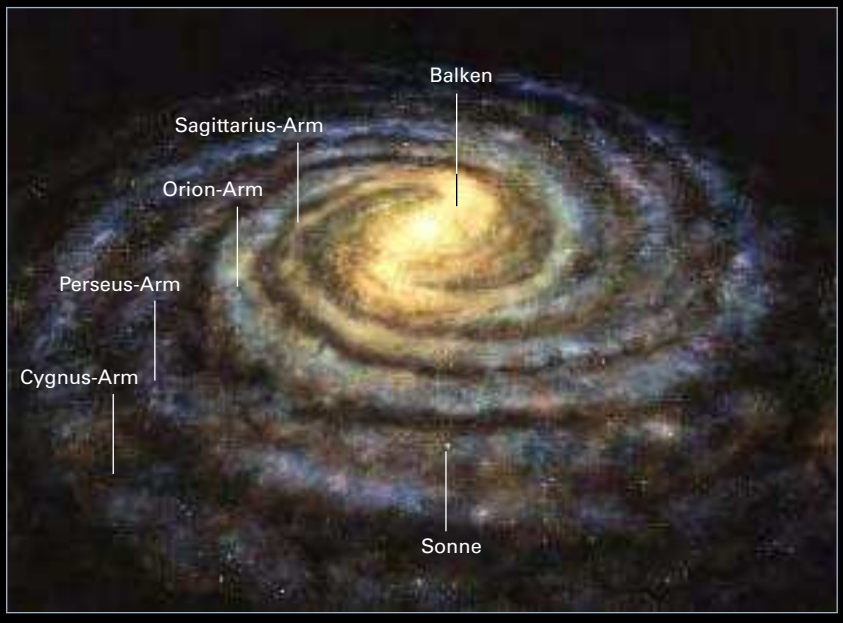
Wenngleich Balken und Spiralarme wie starre Strukturen erscheinen, sind sie in Wahrheit sehr dynamisch: Es handelt sich um Wellen, die durch die Scheibe aus Sternen, Gas und Staub hindurchlaufen und dabei die Materie heftig umverteilen können. Da sich solche Vorgänge über Jahrmillionen hinweg abspielen, sehen wir sie wie in einer Momentaufnahme gleichsam eingefroren. Derartige Wellen sind ein Beispiel dafür, wie sich scheinbar konstante Eigenschaften von Galaxien – etwa ihre Form – im Lauf der Äonen erheblich verändern können. Ein wei- ▷

AAO, STEVE LEE & DAVID MALIN

Die meisten Spiralgalaxien wie beispielsweise NGC 1097 (rechts) zeigen eine zentrale längliche Struktur aus Sternen, einen so genannten Balken, andere, wie M 51 (links), hingegen nicht. In beiden Arten von Spiralgalaxien sammeln sich Sterne, Gas und Staub in einer flachen, rotierenden Scheibe. Balken und Spiralarme markieren relativ dichte Regionen. Trotz vieler neuer Erkenntnisse geben diese auch heute noch den Forschern Rätsel auf.

Der Balken der Milchstraße

Unser Milchstraßensystem, eine reine Spiralgalaxie? Früher glaubten Astronomen das. Doch heute wissen wir, dass sie tatsächlich eine Balkenspirale ist. Dies wurde kürzlich durch Infrarot-Beobachtungen bestätigt. Infrarote Strahlung vermag die interstellaren Staubwolken zu durchdringen und zeigt uns so Strukturen, die im sichtbaren Licht nicht zu erkennen sind. Im Bild der 2MASS-Durchmusterung (oben) verläuft die Milchstraße horizontal, ihr Kern befindet sich in der Mitte. Die Farben repräsentieren die Intensität der Strahlung bei drei Wellenlängen im nahen Infrarotbereich. Die Galaxis ist dicker als erwartet und ihr Kern ist auf der linken Seite ausgedehnter als auf der rechten. Beides deutet auf einen Balken hin, so wie es die künstlerische Darstellung (unten) zeigt.



OBEN: 2MASS, JOHN CARPENTER, TOM JARRETT & ROBERT HURT; UNTEN: DON DIXON

IN KÜRZE

- In den 1960er Jahren erkannten Astronomen: **Spiralarme sind keine dauerhaften galaktischen Strukturen**, sondern zeitweilige Erhöhungen der Materiedichte. Auf ihren Bahnen kommen sich Sterne und Gaswolken in einem rhythmischen, sich selbst verstärkenden Prozess näher und driften wieder auseinander.
- Bis vor Kurzem noch konnten Theoretiker wesentliche Aspekte dieser Wellen nicht erklären, zum Beispiel die beobachtete Häufigkeit von Galaxien mit unterschiedlichen Formen. Wie sich zeigte, muss **interstellares Gas in die Modelle** miteinbezogen werden.
- Indem Wellen Drehimpuls transportieren, kann Materie in das Zentrum einer Galaxie gelangen – wovon das dort ansässige Schwarze Loch profitiert. Und durch das **zyklische Verhalten der Wellen** wandelt sich die Form einer Galaxie. Diese theoretischen Erkenntnisse konnten inzwischen durch Beobachtungen an nahen und fernen Galaxien untermauert werden.

▷ teres Beispiel ist der galaktische Kannibalismus: Durch Verschmelzen mit einer Nachbargalaxie kann ein geordnetes Spiralsystem in eine strukturlose Elliptische Galaxie verwandelt werden, in der die Sterne wie in einem Bienenschwarm durcheinander schwirren. Doch die Wellenprozesse im Inneren einer Galaxie könnten sogar einen noch größeren Einfluss haben als solche Verschmelzungen.

Kosmischer Verkehrsstau

Alle Spiralgalaxien, ob mit Balken oder ohne, rotieren: Ihre Sterne umkreisen das Zentrum in geregelten Bahnen. Aber sie rotieren nicht starr wie feste Scheiben. Im Milchstraßensystem haben die innersten Sterne in den vergangenen fünf Milliarden Jahren viele tausend Male das Zentrum umkreist, während die Sonne, etwa auf halbem Weg zum Scheibenrand gelegen, nur rund zwanzig Umrundungen vollführt hat. Diese Unterschiede in den Umlaufperioden zeigen, dass Balken und Spiralarme keine festen Gebilde sein können. Ansonsten würden sie sich rasch wie ein Seil um eine Winde aufwickeln.

Seit Langem fragen sich Astronomen, was die Formen der Galaxien stabilisieren könnte. In den 1960er Jahren gelang es Chia-Chiao Lin und Frank Shu vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, dieses Rätsel mit der Theorie der Dichtewellen zumindest teilweise zu lösen. Balken und Spiralarme sind demnach Wellen erhöhter Dichte, in denen Sterne wie in einem kosmischen Verkehrsstau dichter zusammenrücken. Sterne gelangen in diese Wellen hinein und wieder hinaus, genau wie Autos am hinteren und vorderen Ende eines Staus.

Die Welle selbst entsteht durch das Zusammenspiel aller Sternumlaufbahnen. Die Bahn eines Sterns in einer Galaxie lässt sich nicht mit dem elliptischen Orbit eines Planeten um die Sonne oder eines Satelliten um die Erde vergleichen, denn es gibt keinen dominierenden Zentralkörper. Zwar befindet sich im Zentrum der meisten Galaxien ein massereiches Schwarzes Loch, doch dieses trägt nur zu einem kleinen Teil zur Galaxienmasse bei. Der Löwenanteil der Masse ist vielmehr über die gesamte Galaxie verteilt. Deshalb kehrt ein Stern nach einem Umlauf nicht an seinen Ausgangsort zurück: Die Bahn ist keine geschlossene Ellipse, sondern gleicht einer komplizierten Rosette (siehe Kasten rechts). Die Sonne beispielsweise benötigt 230 Millionen

Jahre für einen elliptischen Umlauf. In dieser Zeit verschiebt sich ihre Bahn um 105 Grad; das entspricht einer vollen Drehung alle 790 Millionen Jahre.

Wenn sich die elliptischen Sternbahnen mit völlig verschiedenen Geschwindigkeiten drehen, entsteht in der Galaxie keine Wellenstruktur. Zwar kommen sich Sterne zufällig nahe, aber sie entfernen sich schnell wieder voneinander – ähnlich wie Autos im fließenden Verkehr auf einer Autobahn. Eine Welle bildet sich dann aus, wenn sich viele oder gar alle Ellipsen gleich schnell drehen. In einer Balkenwelle sind die Ellipsen gleich ausgerichtet, wodurch entlang ihrer Hauptachse eine Region erhöhter Dichte entsteht. In einer Spiralwelle sind die Umlaufbahnen zunehmend gegeneinander verdreht – hier verläuft die Region erhöhter Dichte entlang einer gekrümmten Linie.

Die Umlaufbahnen der Sterne können sich also als Kollektiv bewegen, auch wenn die Sterne selbst das nicht tun. Was aber veranlasst die Ellipsen dazu, sich gewissermaßen im Gleichschritt zu bewegen? Der Grund ist eine spontane Gravitationsinstabilität. Da die Schwerkraft in diesen Systemen keine feste äußere Kraft ist, sondern von den Sternen hervorgerufen wird, gibt es eine Rückkopplung: Die Wellen können sich selbst verstärken. Der Vorgang beginnt, wenn Sternenorbits zufällig gleich orientiert sind.

Synchronisieren der Umlaufbahnen

Verstärkt durch die gegenseitige Nähe, beeinflusst die Schwerkraft der Sterne die Drehgeschwindigkeit der Ellipsen. Sie bremst schnellere ab und beschleunigt langsamere – und führt so zu einer Synchronisierung der Bewegung. Wenn ein Stern sich in die Welle hineinbewegt, hält ihn diese Schwerkraft-Rückkopplung fest – aber nur für eine Weile. Irgendwann löst sich die Rückkopplung und der Stern verlässt die Welle wieder. Wenn als Ausgleich dafür am anderen Ende der Welle immer wieder neue Sterne eintreten, bleibt die Welle als solche erhalten.

In den inneren Bereichen einer Galaxie bewegen sich die Sterne schneller als die Welle, holen diese also ein. In den Außenbereichen hingegen sind die Sterne langsamer als die Welle und werden folglich von ihr eingeholt. Zwischen diesen beiden Regionen liegt der so genannte Korotationskreis, auf dem Welle und Sterne sich mit gleicher Geschwindigkeit bewegen. ▷

Wie Ordnung in die Umlaufbahnen kommt

Balken und Spiralarme entstehen nach heutiger Kenntnis durch Wellen, die sich durch die Galaxie ausbreiten. Wenn die Wellenfront eine Region durchquert, nähern sich die Sterne einander an; wenn sie die Region verlässt, entfernen sich die Sterne wieder voneinander. Dabei schiebt die Welle die Sterne nicht im wörtlichen Sinne zusammen, vielmehr beeinflusst sie sanft die Choreografie ihrer Umlaufbahnen.

◀ **Rosettenbahnen:** Im komplexen Gravitationsfeld einer Galaxie bewegt sich jeder Stern auf einer elliptischen Bahn, doch verschiebt sich deren Lage ebenfalls. Nach Vollenden eines Orbits kehrt der Stern deshalb nicht an seinen Ausgangsort zurück. Diese sekundäre Bewegung ist Grundlage der galaktischen Wellen.

▶ **Keine Wellenbewegung** entsteht, solange die Umlaufbahnen der Sterne zufällig orientiert sind. (Der Übersichtlichkeit wegen zeigt die Abbildung nur eine Auswahl von Umlaufbahnen – jene, die in einem mitrotierenden System geschlossene Kurven bilden.)

◀ **Balkenwellen** entstehen, wenn sich die Umlaufbahnen gleich ausrichten. Die Schwerkraft führt dazu, dass sich die Ellipsen im Kollektiv bewegen und ihre Ausrichtung erhalten bleibt. Die Wellenfront ist die Region größter Sternendichte, die entlang der Hauptachsen der Umlaufbahnen anzutreffen ist.

▶ **Spiralwellen** bilden sich, wenn sich die Ellipsen zwar im Kollektiv bewegen, aber nicht exakt die gleiche Orientierung aufweisen; vielmehr ist jede Ellipse leicht gegen ihre Nachbarn verdreht. Die Sternendichte ist dann dort am größten, wo sich die Ellipsen besonders nahe kommen.

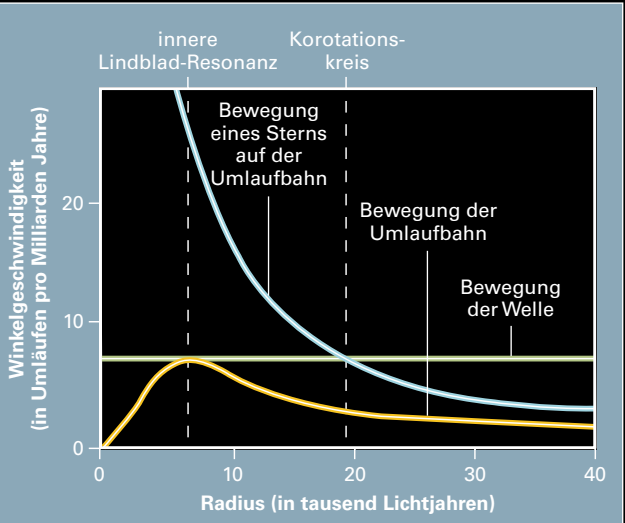
◀ **Balkenspiralen** entstehen, wenn die Umlaufbahnen nahe dem Galaxienzentrum die gleiche Ausrichtung aufweisen, weiter außen aber gegeneinander verdreht sind.

ALISON KENDALL

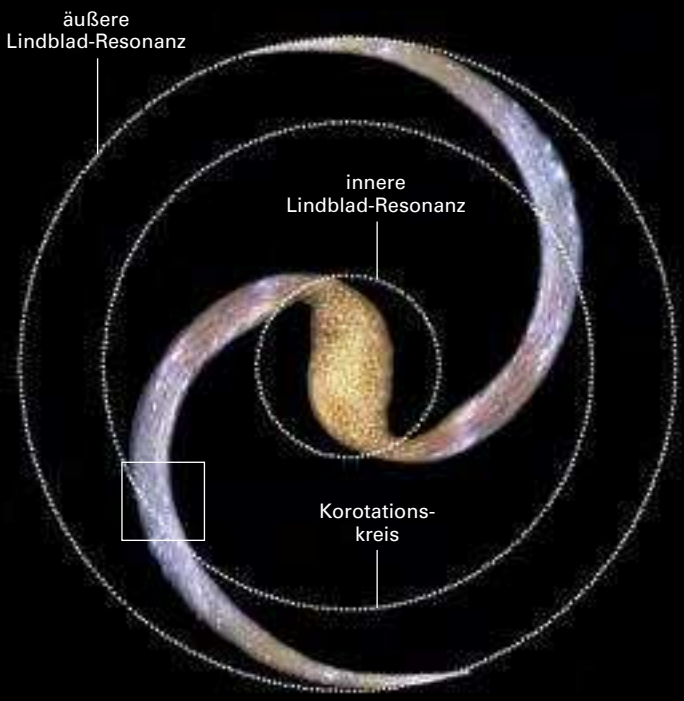
Anatomie einer galaktischen Welle

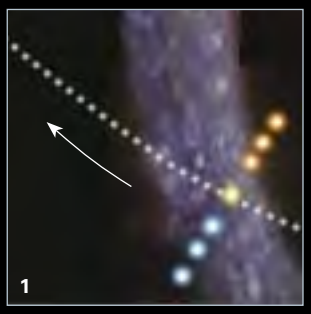
In mancher Hinsicht ähneln Balken und Spiralarme einer »La Ola« im Sportstadion: Von der Wellenfront erreicht, handeln die Zuschauer koordiniert – sie stehen gemeinsam auf und setzen sich wieder gemeinsam. Ganz ähnlich arrangieren sich die Umlaufbahnen der Sterne in einer Weise, dass sie die Sterne in bestimmten Gebieten näher zueinander bringen. Allerdings gibt es bei den galaktischen Wellen die zusätzliche Komplikation, dass sich die Sterne selbst bewegen.

Die für uns sichtbaren Spiralarme sind eine Momentaufnahme der Welle. Im hier gezeigten Beispiel bewegt sich die Welle im Uhrzeigersinn. Auch die einzelnen Sterne bewegen sich im Uhrzeigersinn, aber mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (kleine Bilder). Im inneren Bereich bewegen sich die Sterne schneller als die Welle, sie holen sie also ein, bewegen sich hindurch und treten wieder heraus. In den äußeren Bereichen dagegen trifft die Welle von hinten auf die Sterne und rollt über sie hinweg. Die Grenze zwischen diesen beiden Bereichen bezeichnen Astronomen als Korotationskreis. Die Länge der Spiralarme ergibt sich aus zwei weiteren Kreisen, den so genannten Lindblad-Resonanzen, bei denen sich Welle und Sterne in Phase bewegen.



Die Winkelgeschwindigkeit der Welle ist überall in der Galaxie konstant. Im Gegensatz dazu fällt die Geschwindigkeit der Sterne nach außen ab. Am Korotationskreis stimmen beide Geschwindigkeiten überein. Die Umlaufbahnen der Sterne sind nicht fest, sie drehen sich ebenfalls. Dort, wo ihre Umlauffrequenz mit der Winkelgeschwindigkeit der Welle übereinstimmt, befinden sich die Lindblad-Resonanzen (der Übersichtlichkeit wegen zeigt das Diagramm nur eine der Resonanzen).





Die Welle bewegt sich im Uhrzeigersinn (von rechts unten nach links oben in diesem Kasten), genau wie die Sterne.

Innere Sterne (orange) bewegen sich schneller als die Welle, äußere (blau) dagegen langsamer.

KASTEN LINKS: ALISON KENDALL; RECHTS: DON DIXON

▷ Neben dem Korotationskreis gibt es zwei weitere spezielle Zonen in der Scheibe – eine innerhalb, eine außerhalb des Kreises. Sie heißen nach ihrem Entdecker, dem schwedischen Astronomen Bertil Lindblad (1895–1965), Lindblad-Resonanzen. An diesen Stellen bewegen sich die Sterne synchron zu den Wellen: Jedes Mal, wenn sie mit der Welle zusammentreffen, befinden sie sich an einem bestimmten Punkt ihrer Umlaufbahn. Das führt dazu, dass die Welle einen sanften Zug auf den Stern ausübt. Die Lindblad- und andere Resonanzen spielen eine wichtige Rolle für die Ausformung der Umlaufbahnen und die Eingrenzung der Dichtewellen. Ähnliche Prozesse sind bei der Entstehung von Planetenringen am Werk (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2002, S. 36).

Die Theorie der Dichtewellen erklärt, wie Balken und Spiralarme trotz der Sternbewegung bestehen können. Doch schon kurz nach Entwicklung der Theorie durch Lin und Shu stießen andere Forscher auf Probleme. So bemerkte Alar Toomre vom Massachusetts Institute of Technology, dass die Wellen Energie verlieren, weil sie Stoßwellen im interstellaren Gas auslösen. Irgendein Prozess muss

den Wellen also beständig Energie zuführen. Einer der Erklärungsversuche setzte eine kompliziertere Wellenbewegung voraus: Statt einer einzigen Welle, die sich durch die Galaxie bewegt, sollte es mehrere einwärts und auswärts laufende Wellen geben. Am Korotationskreis würden diese Wellen entweder reflektiert oder durchgelassen, wobei sie auf Kosten der globalen Rotationsenergie der Galaxie Energie aufnehmen. Durch mehrmaliges Passieren der Zentralregion würden sich die Wellen dabei selbst verstärken wie in einem kosmischen Hallraum.

Kosmischer Quirl treibt Spiralstruktur an

Dieser komplexe Mechanismus der Wellenverstärkung und -reflexion erschien plausibel. Doch die Gleichungen zur Beschreibung dieser Vorgänge erwiesen sich als zu kompliziert, um ohne strenge Näherungen exakt gelöst werden zu können. Die Astronomen waren also auf numerische Computersimulationen angewiesen – ebenfalls alles andere als einfach im Zeitalter der Lochkarten. Und die ersten Versuche deuteten darauf hin, dass die komplexen Wellenbewegungen die Spiralstruktur keineswegs retteten, sondern vielmehr ihre Zerstörung noch beschleunigten. Zwar bildeten sich in den Simulationen Spiralstrukturen heraus, aber sie verschwanden rasch wieder und ließen einen Balken zurück. Es gelang Theoretikern nicht, die Bildung des Balkens zu verhindern, ohne in Widersprüche mit anderen Beobachtungen zu geraten. Eine Erklärung von Spiralgalaxien schien damit nicht möglich.

Dieser unbefriedigende Zustand änderte sich erst in den 1980er und 1990er Jahren, als meine Kollegen und ich den Simulationen eine weitere Zutat beifügten: interstellares Gas. Da es nur wenige Prozent der Masse einer Spiralgalaxie ausmacht, hatten die Modellierer diesen Anteil bis dahin vernachlässigt, um die Rechnungen in verträglichem Rahmen zu halten. Doch das Gas spielt für die Dynamik eine Rolle, die weit über seinen Massenanteil hinausgeht. Interstellare Gaswolken kollidieren häufig miteinander und wandeln dabei Bewegungsenergie in Stoßwellen und Strahlung um. Dadurch reagieren die Wolken empfindlicher auf Instabilitäten der Wellen. Sterne hingegen stoßen selten zusammen, sodass ihre Geschwindigkeitsunterschiede größer sind und einer vorbeilaufenden Welle einen größeren Widerstand entgegensetzen.

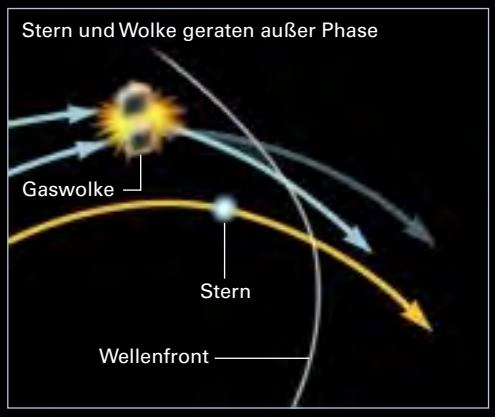
Durch Berücksichtigen des Gases erzeugten die Simulationen sofort vielfältige Galaxienformen. Das von dem stellaren Balken ausgeübte Drehmoment wirkt wie ein kosmischer Quirl und treibt so beständig eine Spiralstruktur im Gas an. Und diese Spiralen verschwanden nun nicht mehr wie in früheren Simulationen. Zudem lösten die mit Gas angereicherten Wellen weitere Probleme der galaktischen Astronomie. So lieferten sie eine Erklärung für die Staubbänder, die am vorderen Ende der Spiralarme auftreten. Wegen der Kollisionen bewegt sich das mit Staub vermischte Gas nicht in Phase mit den Sternen: Es verliert Bahnenergie, fällt in Richtung Zentrum und bewegt sich deshalb vor den Sternen in den Spiralarmen her (siehe Kasten unten).

Innerhalb weniger Drehungen des Balkens – typischerweise innerhalb von einer Milliarde Jahren – kann die Energiedissipation das Gas bis ins Zentrum der Galaxie transportieren. Dort entstehen aus dem Material neue Sterne. Auf diese Weise liefern die Wellen eine Erklärung für die anhaltend hohe Sternentstehungsrate in den Galaxienzentren. Ebenso könnten sie das Rätsel lösen, wie die zentralen Schwarzen Löcher ihren Materienachschub erhalten. Es ist keineswegs so einfach wie allgemein gedacht, Materie in ein Schwarzes Loch hineinzubekommen. Zwar tendiert eine Galaxie dazu, ihre potenzielle Energie zu minimieren, indem sie ihre Masse zum Zen- ▷

Gas gegen Sterne

Galaktische Wellen haben große Bedeutung für die Umverteilung des interstellaren Gases – und damit für die Sternentstehung. Entscheidend dafür ist, dass Sterne und Gas zwar beide an der Welle beteiligt sind, aber unterschiedlich darauf ansprechen.

Betrachten wir einen Stern und eine Wolke, die zunächst ähnliche Umlaufbahnen besitzen. Der Stern bleibt auf seiner Bahn, doch die Wolke stößt wegen ihrer Größe mit anderen Wolken zusammen, verliert dadurch Energie und sinkt auf einen niedrigeren Orbit ab. Somit kann die galaktische Welle Sterne und Gaswolken nicht in eine perfekt synchrone Bewegung bringen.



Das Ungleichgewicht der Kräfte, das sich dadurch ergibt, dass Wolke und Sterne sich nicht synchron bewegen, erzeugt ein auf die Wolken wirkendes Drehmoment. Innerhalb des Korotationskreises bewegt sich eine Wolke schneller als die Sterne im Balken, sodass sie von der Schwerkraft der Sterne zurückgehalten wird – sie verliert Bahnenergie und Drehimpuls und fällt einwärts. Außerhalb des Korotationskreises wird sie dagegen in ihrer Bahn nach vorne gezogen – nimmt also Bahnenergie und Drehimpuls auf und bewegt sich nach außen.

DON DIXON

▷ trum hin konzentriert. Doch die Rotation und die daraus resultierenden Fliehkräfte liefern ein Gegengewicht zur Gravitation (siehe Spektrum der Wissenschaft 12/2004, S. 44). Damit Materie nach innen fallen kann, muss Drehimpuls auf galaktischen Skalen nach außen transportiert werden. Balken und Spiralarme können das leisten.

Wellen als Gaslieferant

Astronomen haben beobachtet, dass das Gas nicht gleichmäßig, sondern in großen Schüben in die Schwarzen Löcher fällt. Wellen können den Schwarzen Löchern in zwei Schritten ihren Nachschub liefern. Im ersten Schritt erreicht das Gas eine Resonanz, bei der es sich in Phase mit dem Balken bewegt und somit gegen das von ihm ausgeübte Drehmoment immun ist. Das Gas sammelt sich in einem Ring, in dem neue Sterne entstehen. Im zweiten Schritt bilden Gas und Sterne in dem Ring eine eigene kleine Balkenwelle. Die Wirkung dieses Minibalkens lässt das Gas dann in das Schwarze Loch fallen. Im Milchstraßensystem haben Beobachtungen im nahen Infrarot bereits Hinweise auf einen solchen Balken geliefert. Die Wellen sind also weit mehr als eine hübsche Dekoration – sie erlauben der Galaxis zu wachsen.

Der Balken kann Materie nicht nur innerhalb der Scheibe verschieben, sondern auch vertikal zu ihr. Ein Stern gerät nämlich in Resonanz, wenn die vertikalen Auslenkungen seiner Bahn und seine Begegnungen mit dem Balken mit der gleichen Periode (oder einem Vielfachen davon) auftreten. Dann kann der Balken die Auslenkung verstärken – ähnlich wie ein Erwachsener einem Kind auf einer Schaukel Schwung gibt. Wir sind zufällig auf dieses Phänomen gestoßen: In 3-D-Simulationen verdickte sich die Scheibe aus Sternen im Bereich der Resonanz erheblich und gab der inneren Region der Galaxie eine kasten- oder erdnussar-

Eine Galaxie erneuert sich selbst

Früher dachten Astronomen, Balken und Spiralarme seien dauerhafte Strukturen – heute gehen sie davon aus, dass diese Strukturen in beständigem Wandel entstehen und vergehen. Der gleiche, von der Schwerkraft ausgelöste Prozess, der sie erzeugt, zerstört sie auch – und erzeugt sie aufs Neue, wie die hier gezeigte Computersimulation zeigt.

Start

Die Galaxie entsteht als strukturlose Scheibe aus Sternen, Gas und Staub.

2 Milliarden Jahre

Balken- und Spiralwellen entwickeln sich. Gas fällt aus dem intergalaktischen Raum ein und wird die Scheibenmasse innerhalb von 6,5 Milliarden Jahren verdoppeln.

5 Milliarden Jahre

Die Wellen werden stärker. Der Balken nimmt Gas in der Nähe des Kerns auf, hält aber zugleich das intergalaktische Gas fern.

8 Milliarden Jahre

Das im Kern angesammelte Gas beginnt den Balken zu zerreißen.

11 Milliarden Jahre

Der Balken ist zerstört. Nicht länger durch das von ihm ausgehende Drehmoment zurückgehalten, strömt das intergalaktische Gas aus den äußeren Bereichen in den Kernbereich der Galaxie ein.

14 Milliarden Jahre

Der Balken bildet sich neu. Der Einfall des Gases spielt dabei die entscheidende Rolle: In Simulationen ohne Gaseinfall taucht der Balken, einmal verschwunden, nie wieder auf.

17 Milliarden Jahre

Wie zuvor beginnt der Balken sich aufzulösen.

20 Milliarden Jahre

Der Balken ist fast vollständig verschwunden. In Simulationen mit anderen Bedingungen entsteht und verschwindet der Balken noch schneller.

ALISON KENDALL

ABDRUCK GENEHMIGT VON AAAS AUS: ROBERTO G. ABRAHAM, SIDNEY VAN DEN BERGH, SCIENCE 17. AUG. 2001, VOL. 293, FIG. 2

Ferne Galaxien liefern uns einen Einblick in eine frühe Epoche der kosmischen Geschichte. Schon damals zeigten die Galaxien die gleichen Strukturen – Balken und Spiralarme – wie heute. Das stützt die These, dass interne Wellenprozesse solche Strukturen erzeugen. Diese Sternsysteme sind so weit von uns entfernt, dass ihre detaillierte Struktur nur schwer zu erkennen ist. Die Forscher streiten deshalb noch über die relativen Häufigkeiten der unterschiedlichen Galaxientypen.

tige Form. Diese Entdeckung erklärt die seltsamen Formen ferner Sternsysteme, die Beobachter seit über einem Jahrzehnt mit Großteleskopen registrieren.

Indem er Materie in den Kern der Galaxie hineinzieht, kann sich der Balken allerdings auch selbst auflösen. Die angesammelte Masse stört die synchrone Bewegung der Sterne, wie sie für einen Balken erforderlich ist, und treibt sie auseinander. Die Balken, die in den Simulationen zu robust erschienen, solange man nur die Sterne berücksichtigte, erweisen sich somit als recht fragil, sobald man Gas hinzufügt. Wie kommt es aber dann, dass wir so viele Balkenspiralen sehen? Auf optischen Aufnahmen zeigen zwei Drittel aller Galaxien Balken; infrarote Durchmusterungen im Jahr 2002 erhöhten diesen Wert sogar auf drei Viertel. Die logische Schlussfolgerung daraus kann nur lauten: Balken entstehen, fallen auseinander – und entstehen wieder neu in einem fortdauernden Zyklus (Kasten links).

Wie aber schaffen es die Balken, wie der Phönix aus der Asche zu steigen? Die Galaxie muss sich dazu von den Bedingungen, die den Balken zerstört haben, deutlich wegentwickeln. Insbesondere müssen die Sterne wieder geordnete Umlaufbahnen annehmen, deren Geschwindigkeiten sich wenig unterscheiden. Dies wäre möglich, falls die Galaxie eine große Menge an intergalaktischem Gas aufsammelt. Wenn Gaswolken in die Galaxie eindringen, kollidieren sie miteinander, verlieren Energie und ihre Umlaufbahnen gleichen sich an. Ihr zunächst hoher Drehimpuls verlangsamt den Einfall Richtung Zentrum und gibt so dem Balken genügend Zeit, sich neu zu formen. Die notwendige Menge an Gas ist gewaltig: Um den Balken in der geforderten Zeit neu zu bilden können, muss eine typische Galaxie innerhalb von zehn Milliarden Jahren ihre Masse verdoppeln. Wie die Astronomen inzwischen wissen, enthält der intergalaktische Raum tatsächlich genügend Gas, um dieses Szenario zu erfüllen (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2004, S. 46).

Man kann dieses Modell testen, indem man einen Blick zurück in die kosmische Vergangenheit wirft. Einen ersten Versuch unternahm ein Team um Sidney van den Bergh vom Herzberg-Institut für Astrophysik in Victoria (Kanada). Mit dem Hubble-Weltraumteleskop untersuchten die Wissenschaftler von 1998 bis 2002 die Form früherer Galaxiengenerationen. Aus ihren Beobachtungen zogen sie den Schluss, dass Balken damals sehr viel seltener waren als heute.

Permanente Metamorphosen

Dieses Ergebnis überraschte: Es ließ nicht nur am Modell des Gaseinfalls zweifeln, sondern an der gesamten Theorie der Balkenwellen. Frühe Galaxien enthielten mehr Gas und ihre Masse konzentrierte sich weniger stark zum Zentrum hin – deshalb wäre es eher zu verstehen, wenn Balken bei ihnen häufiger auftreten als bei heutigen Galaxien. Kürzlich zeigten Shardha Jogee von der Universität von Texas in Austin und ihre Koautoren, dass die Ergebnisse von van den Bergh auf einem Auswahleffekt beruhen. Balken sind in fernen Galaxien nur schwer zu erkennen. Korrigiert man die Beobachtungen gegen diesen Effekt, so zeigt sich: Balken waren in der Vergangenheit genauso häufig wie heute. Das deutet darauf hin, dass die Balken tatsächlich fortwährend zerstört werden und sich wieder neu bilden.

Galaxien entstehen also offenbar nicht in einer bestimmten, für alle Zeiten festgelegten Form. Sie durchlaufen vielmehr eine permanente Metamorphose. Wenn drei Viertel aller Galaxien einen Balken zeigen, so bedeutet dies, dass eine typische Galaxie drei Viertel ihrer Zeit eine solche Struktur aufweisen muss. In dieser Zeit hindert der Balken, frisches Gas am Eindringen in die Zentralregion der Galaxie. Das Gas sammelt sich dann in den Außenbereichen an. Erst nach dem Zerfall des Balkens strömt es nach innen und verjüngt die Galaxie.

Es gibt noch einen anderen, bekannteren Weg, um Masse in Galaxien anzusammeln: Kannibalismus oder aufeinander folgende galaktische Verschmelzungen. Doch dieser Prozess, obwohl ebenfalls sehr wichtig, ist destruktiv. Eine größere Verschmelzung zerstört die Scheibe und lässt eine elliptische Galaxie zurück. Nur eine Minderheit von Galaxien wurde derart gründlich transformiert. Der langsame Zustrom von intergalaktischem Gas erlaubt es einer Galaxie, zu wachsen und dabei ihre Form beizubehalten. Wellen verteilen das frische Material und verhindern, dass die Galaxie aus der Form gerät. So sorgen die Dichtewellen dafür, dass die Vielfalt im Universum erhalten bleibt. ◁

Françoise Combes ist Astronomin an der Sternwarte Paris. Sie zählt zu den führenden Experten auf dem Gebiet der Galaxiendynamik. Im Jahr 2004 wurde sie in die Französische Akademie der Wissenschaften gewählt – als erste Astronomin, der diese Ehre zuteil wurde.

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE

Die Milchstraße. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 4/2003

Galaxien. Von Timothy Ferris. Birkhäuser Verlag, 1996

Galaxies and Cosmology. Von Françoise Combes et al., 2. Aufl., Springer, Berlin 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Genspuren der Menschheitsgeschichte

Spezielle Mutationen, die oftmals mit Krankheiten zu tun haben, ermöglichen es, Migration und Bevölkerungsentwicklung einzelner menschlicher Populationen über Jahrtausende zurückzuverfolgen.

Von Dennis Drayna

Der menschliche Körper braucht Eisen, und das nimmt er aus der Nahrung auf. Arbeitet er dabei veranlagungsbedingt zu gut, kann sich der scheinbare Vorteil ins Gegenteil verkehren: Bei starker Anreicherung von Eisen drohen unbehandelt vielfältige Organschäden und sogar der Tod. Wer an erblicher Hämochromatose – so heißt diese Eisenspeicherkrankheit – leidet, hat von beiden Elternteilen oft jeweils dieselbe Mutation in einem Gen mitbekommen, dessen Protein letztlich an der Eisenaufnahme im Darm beteiligt ist. Das Bemerkenswerte daran: Diese eine Mutation entstand einst vor langer Zeit bei einem einzelnen Menschen in Europa. Über Generationen wurde sie von seinen Nachfahren weitergereicht und gelangte mit ihnen auch in die Neue Welt.

Allein in den USA tragen heute rund 22 Millionen Menschen mindestens eine Kopie des mutierten Gens, darunter Personen, die Tausende von Kilometern voneinander entfernt leben und sich noch nie im Leben begegnet sind. Sie wären sicher überrascht zu erfahren, dass sie weitläufig verwandt sind. Der europäische Urahn, ob weiblich oder männlich, ist der Gründer dieser gesamten Population, und sein genetisches Vermächtnis wird als Gründermutation bezeichnet.

Die Humangenetik kennt heute zwar schon Tausende von genetischen Veränderungen, die mit Krankheiten zu tun haben. Doch Gründermutationen sind Spezialfälle. Wer an einem genetischen Defekt stirbt, bevor er sich fortpflanzen kann, wird ihn zwangsläufig nicht mehr weitergeben. Das ist bei vielen Erbkrankheiten der Fall. Gründermutationen hingegen verschonen oftmals ihre Überträger und können daher vom Gründer weiterverbreitet werden. Manche darauf beruhenden Erbkrankheiten kommen sogar häufig vor. Dazu gehören neben der erwähnten Form der Hämochromatose beispielsweise auch die Sichelzellanämie und die Mukoviszidose.

Von der Untersuchung krankheitsrelevanter Mutationen erhoffen sich medizinische Forscher einiges: einfache Tests, um gefährdete Bevölkerungsgruppen zu ▷

Gensequenzen heute lebender Menschen können Hinweise auf die Migration von Bevölkerungsgruppen vor Tausenden von Jahren geben – und dabei manches Überraschende offenbaren.

SLIM FILMS

▷ identifizieren, sowie neue Ansätze zur Vorbeugung und Behandlung entsprechender Störungen (siehe Kasten S. 39). Überraschendes »Abfallprodukt« solcher Forschungen war die Erkenntnis, dass Gründermutationen den Anthropologen als molekulare Fußspuren der Menschheit in prähistorischer und historischer Zeit dienen können – als ein überaus effektiver Ansatz, die Herkunft menschlicher Populationen und deren Wanderungen auf unserem Planeten nachzuvollziehen.

Was macht solche Mutationen so ungewöhnlich und zugleich so informativ? Zum besseren Verständnis braucht es zunächst ein paar Hintergrundinformationen. Genmutationen entstehen durch zufällige Veränderungen der DNA, der Erbsubstanz. Meist werden sie sogleich repariert oder anderweitig ausgemerzt. Bleibt jedoch die DNA einer Keimzelle – gleich ob Spermium, Eizelle oder einer ihrer Vorläufer – verändert, kann eine solche »Keimbahnmutation« an Nachkommen weitergereicht werden, teils mit schwer wiegenden gesundheitlichen Folgen. Bisher sind mehr als tausend erbliche Störungen bekannt, die durch jeweils ein anderes mutiertes menschliches Gen verursacht werden.

Gründermutationen sind zwar Keimbahnveränderungen, allerdings mit einigen atypischen Eigenschaften. Meist gilt für Erbkrankheiten als Faustregel: Verschiedene Mutationen im gleichen Gen verursachen im Allgemeinen die gleiche Störung, sodass nicht verwandte betroffene Familien sich gewöhnlich in den ursächlichen Mutationen voneinander unterscheiden. Zum Beispiel beruht die häufigste Form der Bluterkrankheit, die Hämophilie A, auf Mutationen in der Erbanlage für den Gerinnungsfaktor VIII. In der Regel zeigt jede Familie, in der erstmals eine Hämophilie A auftritt, eine eigene Mutation in diesem Gen. Auf seiner DNA wurden inzwischen insgesamt an Hunderten von Stellen Abweichungen entdeckt.

Bei einigen wenigen Erbkrankheiten jedoch begegnen die Forscher immer wieder derselben genetischen Veränderung. Diese kann auf zwei Wegen entstanden sein: als so genannte Hot-Spot-Mutation oder als Gründermutation. Ein solcher Hot Spot – wörtlich heiße Stelle – ist ein extrem anfälliger Ort auf dem Erbmolekül: Das dort stehende Basenpaar, die kleinste Einheit der doppelsträngigen DNA, mutiert äußerst oft.

Gemischte Karten

Ein Beispiel liefert die Achondroplasie, eine Form des Zwergwuchses mit gestörter Knorpelbildung. Ihr liegt gewöhnlich eine Mutation am Basenpaar 1138 des so genannten FGFR3-Gens auf dem kurzen Arm von Chromosom 4 zu Grunde. Zwischen Menschen mit der gleichen spontan entstandenen Hot-Spot-Mutation bestehen jedoch in der Regel keine »Blutsbande«; ihre DNA im Umfeld zeigt eine natürliche Variation, wie es für Nichtverwandte typisch ist (siehe Kasten S. 36).

Ganz anders verhält sich das bei Gründermutationen, die unverändert über viele Generationen vererbt werden. Bei jedem Träger ist die betroffene DNA-Stelle in einen längeren Abschnitt eingebettet, der ebenfalls mit der Basenfolge des Erstbesitzers übereinstimmt. Diese allen Trägern gemeinsame »Kassette« mit genetischer Information wird fachsprachlich Haplotyp genannt. Kurzum: Ein gleicher Haplotyp bedeutet einen gemeinsamen Vorfahren, den jeweiligen Gründer.

Wie weit eine interessierende Gründermutation zurückliegt, lässt sich aus der Länge des einheitlichen Haplotyps abschätzen – die wird nämlich mit steigender Generationenzahl kürzer (siehe Kasten S. 37). Der ursprüngliche Haplotyp des Gründers umfasste per Definition das gesamte Chromosom, auf dem die Mutation neu auftrat. Es wurde an Kinder des Gründers weitergegeben, wobei dessen Partner ein normales zweites Chromosom beisteuerte. (Von jedem Elternteil kommt ein einfacher Chromosomensatz.) Bevor in einer Nachkommengeneration wieder Geschlechtszellen mit nur einem Chromosomensatz entstehen, tauscht ein Chromosomenpaar DNA-Abschnitte aus – so als würde man zwei Kartenspiele mit verschiedener Rückenfarbe grob vermischen.

Nach dem ersten so genannten Rekombinationsschritt liegt die Mutation noch inmitten eines sehr langen Abschnitts der Gründer-DNA, ähnlich wie eine gezinkte Karte nach oberflächlichem Mischen der beiden Spiele mit hoher Wahrscheinlichkeit immer noch von zahlreichen Karten der gleichen Farbe umgeben ist. Doch nach jedem erneuten Teilen und Mischen des Stapels werden weniger der ursprünglichen Karten in der Nähe der Indexkarte zu finden sein. Analog wird der Haplotyp mit dem mutierten Gen in jeder weiteren Rekombinationsrunde ein Stück kürzer.

Vergleichsweise junge Gründermutationen – entstanden etwa vor wenigen hundert Jahren – liegen bei heutigen Merkmalsträgern also voraussichtlich in einem ausgedehnten Haplotyp. Umgekehrt sollte es bei sehr alten Mutationen sein, die vielleicht vor Zehntausenden von Jahren erstmals auftraten.

Die genetische Abweichung bei Hämochromatose ist nur ein Beispiel aus einer ganzen Reihe von problematischen Gründermutationen. Etliche davon sind unter Europäern verbreitet und gut untersucht, einige andere wurden in jüngerer Zeit bei indianischen, asiatischen und afrikanischen Bevölkerungsgruppen entdeckt (siehe Kasten S. 38). Auffällig ist vor allem, dass diese Abweichungen etwa hundert- bis tausendmal häufiger in einer Gruppe vertreten sein können als typische krankheitsauslösende Mutationen: Letztere kommen meist nur bei ei-

IN KÜRZE

▶ Wenn **Mutationen in längeren DNA-Abschnitten** liegen, die bei allen Trägern der Mutation identisch sind, dann haben diese Menschen einen gemeinsamen, oft weit zurückliegenden Vorfahren: den so genannten Gründer, bei dem die Mutation erstmals auftrat.

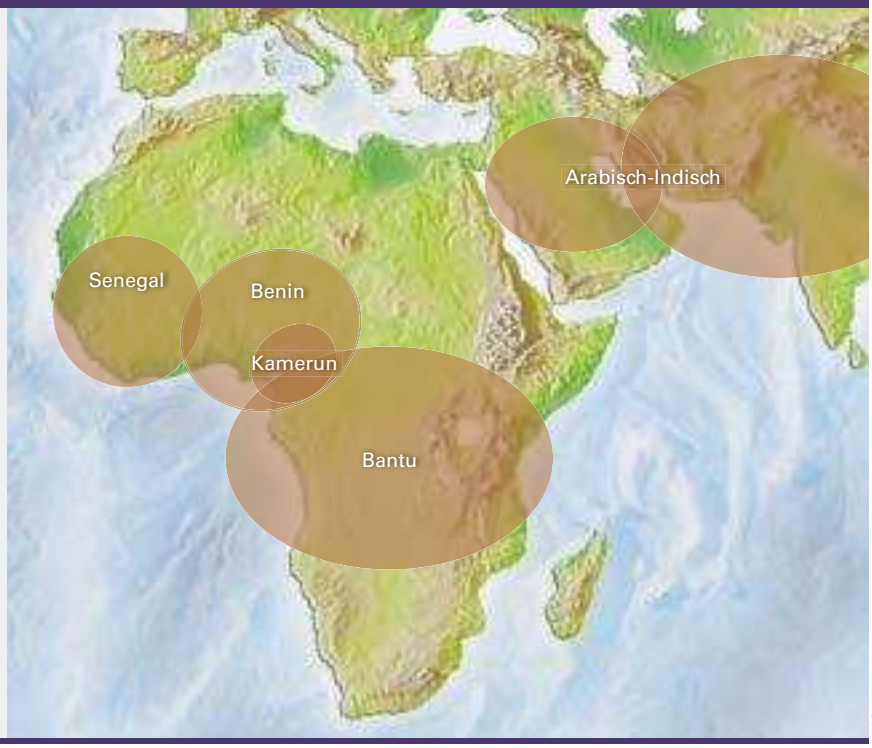
▶ Aus der Länge der einheitlichen Strecke und aus der Häufigkeit, mit der die Gründermutation noch immer in heutigen Menschengruppen vorkommt, lassen sich **das ungefähre Alter der Mutation und der Wanderweg** ihrer früheren Träger bestimmen.

▶ Da sich verschiedene Populationen heute rascher durchmischen, werden sich krankheitsauslösende Mutationen, die bisher mit bestimmten ethnischen Gruppen assoziiert sind, eher **diffus in der Gesamtbevölkerung verteilen.** Die Mediziner werden daher bei der Einschätzung von Erkrankungsrisiken künftig vermehrt DNA-Analysen einsetzen müssen.

Getrennte Ursprünge

Eine potenziell schädliche Mutation kann sich unter bestimmten Bedingungen zu einem gewissen Prozentsatz in der Bevölkerung halten. Typisches Beispiel ist die Sichelzellmutation in Malariagebieten. Träger zweier Kopien leiden an Sichelzellanämie, Träger nur einer Kopie sterben seltener an Malaria. Die Erreger werden durch Moskitos übertragen.

Die Sichelzellmutation ist während der Menschheitsgeschichte offensichtlich insgesamt fünfmal unabhängig entstanden, da sie heute im Kontext von insgesamt fünf verschiedenen »Beisequenzen« vorkommen kann: dem Senegal-, Benin-, Bantu-, Arabisch-Indischen oder dem kürzlich entdeckten Kamerun-Haplotyp. Noch acht Prozent der Afroamerikaner tragen heute zumindest eine Kopie der Sichelzellmutation.



ALISON KENDALL

nem von mehreren tausend bis einigen Millionen Menschen vor, Gründermutationen hingegen bei teils mehreren Prozent einer Bevölkerung.

Dieser hohe Anteil mag zunächst verwundern, denn schädliche Genvarianten sollten sich durch Selektion nicht anreichern. Er liefert aber einen wichtigen Fingerzeig, weshalb Gründermutationen überdauerten und sich über Land und Meer ausbreiteten. Die meisten dieser Mutationen werden nicht dominant, sondern rezessiv vererbt: Die von ihnen verursachte Erkrankung tritt erst in Erscheinung, wenn sowohl das mütterliche als auch das väterliche Chromosom betroffen sind. Bei nur einer mutierten Genkopie, der weitaus häufigere Fall, ist eine Person bloß Überträger. Sie kann diese an ihre Nachkommen weitergeben, was ihnen, sofern es bei der einen bleibt, unter bestimmten Voraussetzungen offenbar einen Überlebensvorteil bietet.

Zum Beispiel schützt die Hämochromatose-Mutation ihre Überträger vermutlich vor einer Eisenmangelanämie (einer früher lebensbedrohlichen Form der Blutarmut), da solche Personen das Eisen aus der Nahrung effektiver aufnehmen können als im Fall zweier normaler Genkopien. In Zeiten mit knappem Angebot an eisenhaltiger Nahrung waren die Überträger also im Vorteil.

Das vermutlich bekannteste Beispiel für eine zweischneidige Mutation ist die Sichelzellanämie. Die verantwortliche Genveränderung entstand offenbar mehrmals in den von der Malaria heimgesuchten Gebieten Afrikas und des mittleren Ostens. Eine einzelne Kopie des Sichelzellgens erhöht die Überlebenschance bei einer Malariainfektion, während zwei Kopien zu einer schweren Anämie mit schmerzhaften Gefäßverschlüssen und verkürzter Lebenserwartung führen.

Fünfmal entstanden – aber immer woanders

Die Sichelzellmutation findet man heute inmitten fünf verschiedener Haplotypen, was darauf schließen lässt, dass sie fünfmal unabhängig voneinander in jeweils nicht verwandten Gründern entstand (siehe Kasten oben). In einigen Fällen beruht die Erkrankung allerdings nicht auf einer Gründermutation.

Die Häufigkeit einer Gründermutation in der Bevölkerung hängt von zwei konkurrierenden Faktoren ab: Menschen mit zwei Kopien des mutierten Gens sterben mit erhöhter Wahrscheinlichkeit, bevor sie sich fortpflanzen, während Träger mit nur einer mutierten Kopie einen Überlebensvorteil gegenüber jenen mit zwei normalen Genen haben. Daraus resultiert eine so genannte balancierte Selektion, bei der die Vorteile des mutierten Gens seine Verbreitung fördern, während die Nachteile sie mindern. Diese gegenläufigen evolutionären Kräfte halten seine Frequenz, seine Häufigkeit in der Bevölkerung über längere Zeiträume betrachtet relativ konstant.

Bei einigen Gründermutationen, die mit Krankheiten zu tun haben, ließ sich noch kein Vorteil ausmachen, obwohl ihre Häufigkeit nahe legt, dass einer besteht. Eine kürzlich veröffentlichte Entdeckung könnte aber erklären, warum die APC-Resistenz – auch Faktor-V-Leiden genannt, weil sie den Gerinnungsfaktor V betrifft – sich in der Bevölkerung gehalten hat. Die verantwortliche Gründermutation, bei etwa 4 Prozent der Europäer nachweisbar, erhöht das Risiko von Thrombosen, also von Gefäßverschlüssen durch Blutgerinnsel, weil das Protein, der Faktor V, wegen ihr schlechter inaktiviert werden kann. Wie Bryce A. Kerlin und seine Kollegen vom Blood Center von Südost-Wisconsin und dem Medical College von Wisconsin in Milwaukee 2003 nachwiesen, haben Überträger bessere Überlebenschancen bei bakteriellen Infektionen der Blutbahn. In Zeiten vor der Entdeckung der Antibiotika war eine schwere Sepsis ▷

Was Gründermutationen auszeichnet

Wenn in einer Gruppe von Patienten mit derselben Krankheit alle an derselben Stelle ihrer DNA dieselbe Veränderung aufweisen – wie kann ein Arzt dann feststellen, was er vor sich hat: eine Gründermutation oder eine Hot-Spot-Mutation? Er braucht nur die umliegende DNA zu analysieren.

Angenommen, bei allen Patienten steht an derselben Stelle statt der DNA-Base Thymin ein Adenin (unten rot hervorgehoben). Bei einer Gründermutation müssen dann auch lange Abschnitte der flankierenden DNA bei allen Patienten identisch sein, weil diese die gesamte Strecke von irgendeinem gemeinsamen fernen Vorfahren – dem so genannten Gründer – geerbt haben. Wäre das falsche »A« hingegen bei den einzelnen Personen immer wieder neu entstanden, weil sich dort eine extrem fehleranfällige Stelle der DNA – ein Hot Spot – befindet, dann wäre das weitere Umfeld nicht einheitlich. Die DNA-Sequenz variiert nämlich zwischen nicht verwandten Personen gewöhnlich noch an bestimmten anderen Stellen (blauer Rahmen ganz unten), wobei die Varianten (gelb) keine Krankheiten verursachen.

Die Sichelzellanämie, bei der länglich verformte rote Blutkörperchen auftreten (Bild oben), beruht in der Regel auf einer Gründermutation. Der chondrodystrophe Zwergwuchs (Bild unten) ist hingegen meist das Resultat einer Hot-Spot-Mutation.

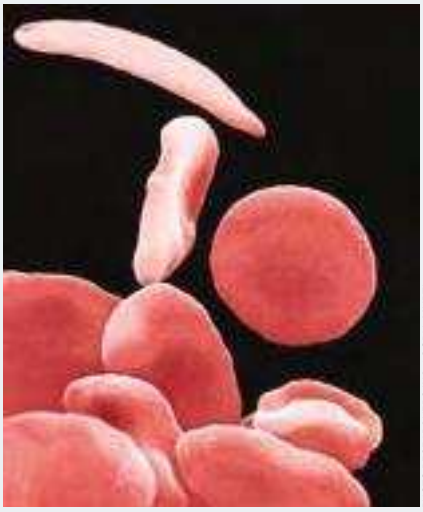
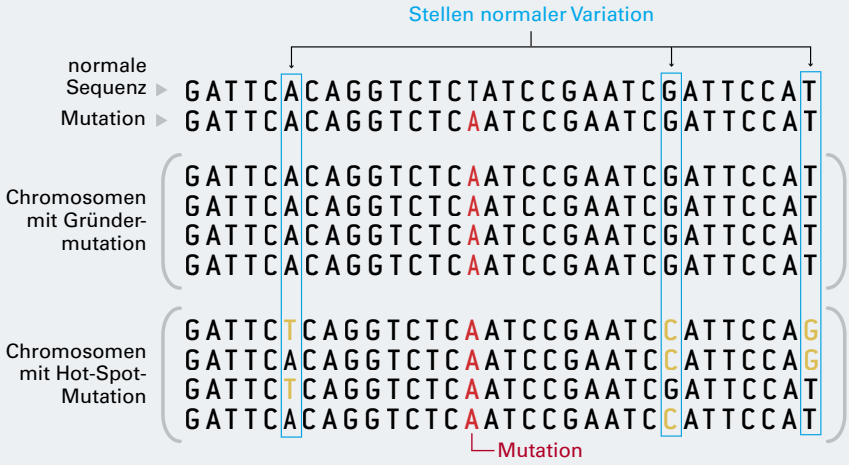


PHOTO RESEARCHERS INC. / GOPAL MURTI

WELLCOME PHOTO LIBRARY



GRAFIK: ALISON KENDALL

▷ lebensbedrohlich, selbst heute sterben noch Menschen daran.

Lange vor der Erfindung der modernen Transportmittel breiteten sich Gründermutationen über große Distanzen aus, was allerdings häufig Dutzende oder gar Hunderte von Generationen dauerte. Das Sichelzellgen zum Beispiel wanderte von Afrika mit den nach Amerika verschleppten Sklaven westwärts, es breitete sich aber auch nach Norden in Richtung Europa aus. Eine häufige Gründermutation in einem Gen mit dem Kürzel GJB2 verursacht Taubheit, wenn sie in doppelter Kopie vorliegt. Von ihrer Ursprungsregion im Mittleren Osten nahm sie zwei Hauptrouten – zum einen entlang der Mittelmeerküste nach Italien und Spanien, zum anderen über die Täler von Donau und Rhein ins nördliche Europa. Eine weitere interessante Gründermutation – im Gen ABCA4 – verursacht eine rezessive Netzhauterkrankung, die zur Erblindung führt. Diese Mutation scheint vor etwa 2700 Jahren in Schweden entstanden zu sein und verbreitete sich dann in südlicher und westlicher Richtung über Europa.

Geschmack verrät unsere afrikanische Herkunft

Das extremste Beispiel einer Wanderung bietet vermutlich eine Genvariante für die Geschmackswahrnehmung. Für etwa drei Viertel der gesamten Menschheit schmeckt die synthetische Substanz Phenylthiocarbamid (PTC) sehr bitter, für das restliche Viertel dagegen überhaupt nicht. Vor Kurzem fanden meine Kollegen an den Nationalen Gesundheitsinstituten in Bethesda (Maryland) und anderen Forschungszentren zusammen mit mir heraus, dass eine ganz bestimmte Konstellation dreier Veränderungen die Nichtschmecker-Variante des PTC-Rezeptorgens auszeichnet. Praktisch alle Nichtschmecker weltweit sind Abkömmlinge eines Gründers, der genau diese Veränderungen des Gens aufwies.

Die Fähigkeit, Bitterstoffe zu schmecken, schützt vor dem Verzehr giftiger Pflanzenteile. Welchen Selektionsvorteil sollte aber ein PTC-Nichtschmecker haben? Wir vermuten, dass die Veränderungen den PTC-Rezeptor umprogrammierten, irgendeinen bisher nicht identifizierten Giftstoff wahrzunehmen.

Die Nichtschmecker-Mutation liegt in einem besonders kurzen Haplotyp; bei manchen Trägern ist er nur 30 000 Basenpaare lang. Dies bedeutet, dass die Gründermutation extrem alt ist und vermutlich bereits vor über 100 000 Jahren entstand. Weltweite Untersuchungen förderten 2004 in Schwarzafrika sieben verschiedene Formen des PTC-Rezeptor-

gens zu Tage, außerhalb der afrikanischen Bevölkerungen jedoch praktisch nur zwei dieser Formen, eine Schmecker- und eine Nichtschmecker-Variante. Von den übrigen fünf Versionen kommt eine gelegentlich bei nichtafrikanischen Populationen vor, nicht jedoch bei den Ureinwohnern der Neuen Welt, während die anderen vier ausschließlich bei Afrikanern nachzuweisen sind.

Die PTC-Nichtschmecker-Mutation verrät bemerkenswert viel über Migrationen in der frühen Menschheitsgeschichte. Ihre heutige Verbreitung und Frequenz bestätigt die »Out of Africa«-Hypothese, die sich auf anthropologische und archäologische Indizien stützt. Sie besagt, dass die ersten anatomisch modernen Menschen in Afrika lebten und dass eine kleine Untergruppe von ihnen vor etwa 75 000 Jahren begann, alle anderen Kontinente zu erobern. Alle heute lebenden nichtafrikanischen Populationen stammen von dieser Gründergruppe ab.

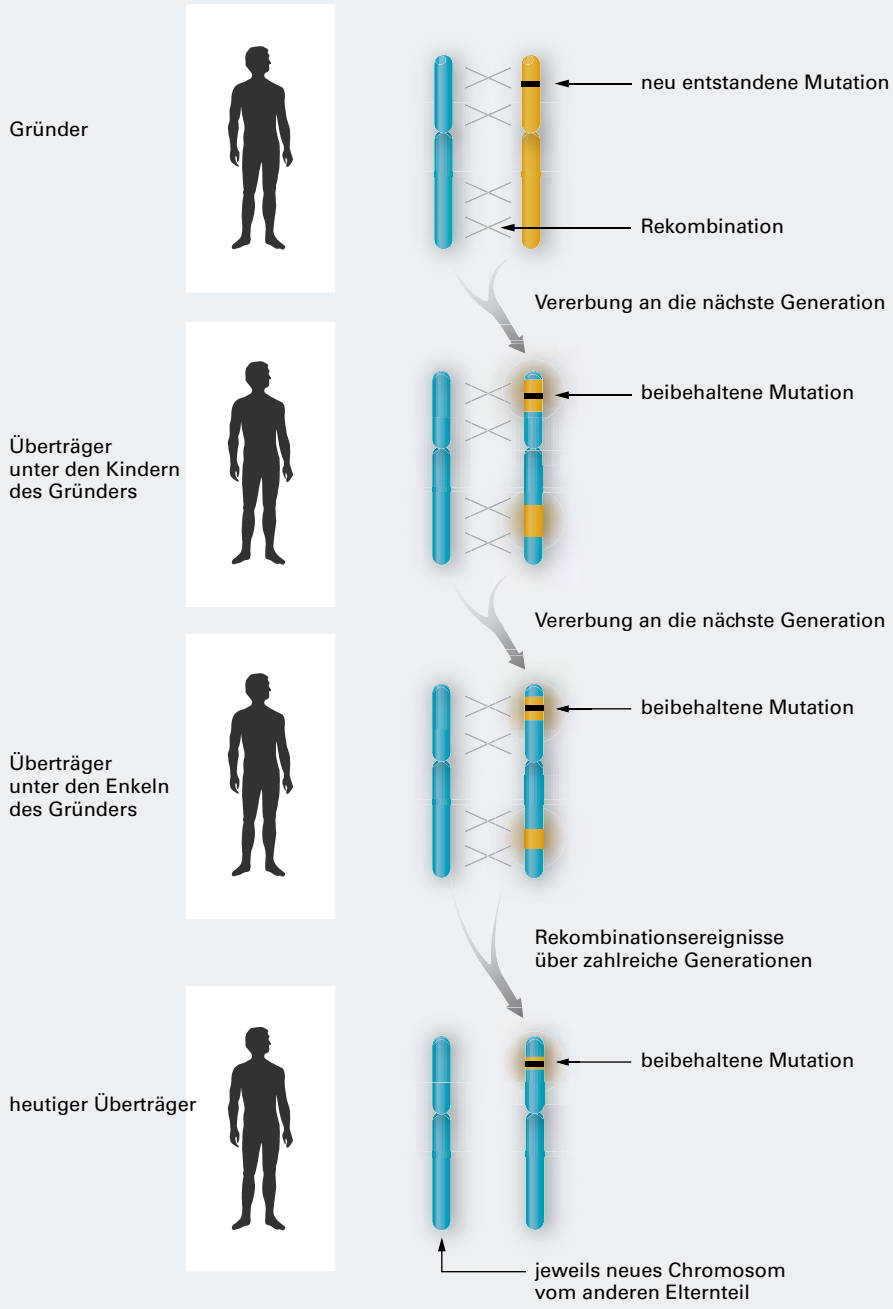
Die Nichtschmecker-Genvariante trägt auch dazu bei, eine der umstrittensten Fragen der modernen Anthropologie zu beantworten: Vermischte sich *Homo sapiens* im Zuge seiner Welteroberung mit archaischeren Hominiden, denen er in Europa und Asien begegnete? Diese Menschenformen verfügten sicherlich über eigene Varianten des PTC-Rezeptorgens, die sich in der Auseinandersetzung mit den giftigen Naturstoffen ihres jeweiligen Lebensraums herausselektiert hatten. Hätte *Homo sapiens* mit ihnen Nachkommen gezeugt, sollten in europäischen, ostasiatischen oder südostasiatischen Populationen unterschiedliche Formen des PTC-Rezeptorgens nachzuweisen sein. Dies ist jedoch nicht der Fall. Unseres Erachtens zeigt die Analyse von Gründermutationen bei heute lebenden Menschen, dass sich *Homo sapiens* bei seiner großen Auswanderungswelle vor Zehntausenden von Jahren nicht mit anderen Hominiden erfolgreich gekreuzt hat.

Als lohnend erweist sich auch ein genauerer Blick auf den Haplotyp der erblichen Hämochromatose. Er illustriert, wie die Verbindung historischer und genetischer Untersuchungen neue Erkenntnisse über die Ursachen und die Geschichte bestimmter menschlicher Krankheiten ermöglicht. In den 1980er Jahren – lange bevor das für diese Eisenspeicherkrankheit verantwortliche Gen ▷

Je älter, desto kürzer

Der Haplotyp, also die einheitliche chromosomale Region um eine Gründermutation, wird von Generation zu Generation kürzer. Der Grund: Wenn sich Spermien oder Eizellen entwickeln, tauschen zwei Partnerchromosomen Abschnitte ihrer DNA aus – sie rekombinieren.

Zunächst ist das ganze Chromosom des Gründers, auf dem die Mutation erstmals entsteht, der neue Haplotyp (gelb hervorgehoben). Sein anderes Chromosom ist normal (blau). Durch den Austausch erben Nachkommen die Mutation auf einem Mischchromosom (teils gelb, teils blau) und daher in einem verkürzten Haplotyp. Das vom anderen Elternteil kommende neue Partnerchromosom ist weiterhin normal (blau). Mit jeder weiteren Rekombination in der jeweils nächsten Generation kann sich der Haplotyp schrittweise verkürzen.



ALISON KENDALL

▷ identifiziert wurde – entdeckten Humangenetiker bei fast allen Patienten auf Chromosom 6 einen großen Abschnitt mit praktisch identischer DNA-Sequenz. Dies verblüffte, denn die meisten Patienten waren offensichtlich nicht miteinander verwandt, sodass in dieser Chromosomenregion, wie anderswo, an irgendwelchen Stellen zufällige Unterschiede vorhanden sein sollten. Die Schlussfolgerungen lauteten: Die Patienten mit erblicher Hämochromatose stammten höchstwahrscheinlich alle von einem gemeinsamen, längst verblichenen Vorfahren ab, und das ursächliche Gen versteckte sich vermutlich in dem gemeinsamen Abschnitt auf Chromosom 6.

Auf Grundlage dieser Hypothese startete unsere Arbeitsgruppe in den 1990er Jahren eine detaillierte Analyse der Gene, die wir in der fraglichen Region zu finden vermochten. Untersucht wurden 101 Patienten sowie zum Vergleich 64 Personen ohne Hämochromatose.

Die meisten Patienten stimmten in einem ausgedehnten Abschnitt von mehreren Millionen Basenpaaren Länge überein, bei einigen jedoch war er wesentlich kürzer. Wir betrachteten daher nur den Teil, der bei sämtlichen Patienten übereinstimmte, und stießen darin auf 16 Gene. 13 davon trugen Bauanweisungen für verschiedene Histone; diese Proteine dienen der kompakten Verpackung der Zell-DNA zu Chromosomen. Sie, und damit auch ihre Gene, spielen eine so grundlegende Rolle für die Zellfunktion, dass sie bei allen Lebewesen praktisch identisch sind. Sehr unwahrscheinlich also, dass sie etwas mit der Entstehung der Hämochromatose zu tun hatten. Demnach blieben nur noch drei Gene als Kandidaten übrig.

Zwei davon unterschieden sich nicht zwischen Patienten und Gesunden. Doch im dritten Gen, heute mit *HFE* bezeichnet, entdeckten wir eine Abweichung, die bei keinem der Gesunden vorkam. Offenbar hatten wir die Gründermutation der erblichen Hämochromatose gefunden.

Keltische Wurzeln

Unsere Entdeckung warf natürlich sofort weitere Fragen auf. Vor allem: Wann und wo hatte der Gründer gelebt? Welcher Volksgruppe gehörte er an? Dazu taten sich Humangenetiker mit Anthropologen und Historikern zusammen und konnten vor Kurzem konkrete Ergebnisse vorweisen.

Die Hämochromatose kommt in ganz Europa vor, mit etwas stärkerer Häufung in den nördlichen Teilen. Wie sich herausstellte, war die Gründermutation bei praktisch allen erkrankten Nordeuropäern vorhanden, aber nur bei weniger als zwei Dritteln der betroffenen Süd- und Osteuropäer. Die restlichen Patienten wiesen demnach wohl irgendeine andere Mutation im HFE-Gen auf oder litten vielleicht in Wirklichkeit an einer anderen Form der Eisenspeicherkrankheit (die Behandlung erfolgt übrigens durch Aderlass).

Eingehendere genetische Untersuchungen zur Verbreitung unserer Gründermutation ergaben, dass sie in Irland, im Westen Großbritanniens und auch südlich des Ärmelkanals in der Bretagne am häufigsten vorkommt. Diese geografische Verteilung überschneidet sich fast genau mit dem heutigen Verbreitungsgebiet von keltischen Populationen.

Als das Römischen Reich vor mehr als 2000 Jahren expandierte, drängte es einige keltische Stämme nach Norden und Westen ab, während andere in ihrer Heimat blieben und sich mit den zuwandernden Südeuropäern vermischten. Die Frage war nun: Entstand die Hämochromatose-Gründermutation bereits in Mitteleuropa und wanderte mit ihren Überträgern nordwärts oder trat sie erstmals im Norden auf? Weitere Untersuchungen der umgebenden DNA auf Chromosom 6 lieferten mit einiger Gewissheit die Anwort.

Die erhebliche Länge des modernen Haplotyps zeigt an, dass die Gründermutation recht jung ist und vermutlich erst vor 50 bis 60 Generationen entstand, also etwa um das Jahr 800. Bei einem höheren Alter hätten wir vielleicht geschlossen, dass der Gründer in Mitteleuropa lebte und dass sich seine Mutation nach Norden und Westen verbreitete, als seine Nachfahren von den

Bemerkenswerte Gründermutationen

Genbezeichnung	Erkrankung/Merkmal	Herkunft der Mutation	Ausbreitung	möglicher Selektionsvorteil nur einer Kopie
HFE	Eisenspeicherkrankheit	Rand Nordwesteuropas	süd- und ostwärts durch Europa	Schutz vor Eisenmangelanämie
CFTR	Mukoviszidose	Süosteuropa/ Mittlerer Osten	west- und nordwärts durch Europa	Schutz vor Durchfall-erkrankungen
HbS	Sichelzellanämie	Afrika/Mittlerer Osten	in die Neue Welt	Schutz vor Malaria
Faktor-V-Leiden	Thromboseneigung	Westeuropa	weltweit	Schutz vor Sepsis
ALDH2	Alkoholtoxizität	Fernost	nord- und westwärts durch Asien	Schutz vor Alkoholismus, eventuell vor Hepatitis B
LCT	Laktosetoleranz (Milchzuckerverträglichkeit)	Asien	west- und nordwärts durch Eurasien	ermöglicht den Genuss tierischer Milch
GJB2	Taubheit	Mittlerer Osten	west- und nordwärts durch Europa	unbekannt

Archaische Gene, moderne Medizin

Die Möglichkeit, Gründermutationen aufzuspüren, wird erhebliche Auswirkungen auf die künftige Medizin haben. Insbesondere in den USA orientieren sich die Ärzte derzeit oft an der ethnischen Zugehörigkeit, um das Risiko eines Patienten für gewisse Erbkrankheiten einzuschätzen und gegebenenfalls weitere Untersuchungen einzuleiten. So tritt die Sichelzellanämie überwiegend bei Personen afrikanischer Abstammung auf.

Da sich die Menschheit heute jedoch rascher durchmischt, wird es schwieriger, dem Einzelnen eine bestimmte geografische Herkunft oder ethnische Zugehörigkeit zuzuordnen. Fällt also der ethnische Hintergrund als diagnostisches Merkmal weg, nimmt die Bedeutung der DNA-Analyse für die Risikoeinschätzung und Diagnose zu. Solange die menschlichen Populationen sich noch nicht zu stark durchmischt haben, besteht die Gelegenheit, weitere Gründermutationen zu finden, was bei der Suche nach den auslösenden Genen für zahlreiche Krankheiten sehr hilfreich sein kann.

Man sollte nämlich die bereits bekannten Gründermutationen als Sonderfälle einer viel größeren Vielfalt krankheitsassoziierter Variationen unseres Genoms auffassen, nach denen Forscher suchen. Solche Varianten sind höchstwahrscheinlich alten Ursprungs. Sie waren vermutlich für ihre Träger unter den damaligen Lebensumständen von Vorteil und verbreiteten sich daher in der Bevölkerung. Unter den Bedingungen der modernen Zivilisation können sich jedoch archaische Gene aus ursprünglich fernen Gegenden nachteilig auswirken.

Zahlreiche Varianten erhöhen vermutlich die Risiken für inzwischen häufige Erkrankungen, nicht nur für seltene Erbkrankheiten. Genuntersuchungen werden daher in der medizinischen Routine zunehmend eine Rolle spielen.

Manche Genvarianten beispielsweise, die an der Cholesterinsynthese mitwirken, dürften heute zu Fettstoffwechselstörungen beitragen. Andere, die Salzverlusten vorbeugen, führen nun wahrscheinlich zur Entwicklung von Bluthochdruck durch Salzempfindlichkeit.

Die Erkenntnis, dass bestimmte genetische Profile mit häufigen Gesundheitsstörungen in Zusammenhang stehen, hat Konsequenzen: Sie wird die Genetik von einer Spezialdisziplin, die sich mit seltenen und obskuren Erkrankungen befasst, in den Mittelpunkt der Prävention, Diagnose und Behandlung menschlicher Krankheiten ganz allgemein rücken.

CORBIS / LARRY WILLIAMS

Für bestimmte Erkrankungen kann der Arzt anhand der ethnischen Zugehörigkeit des Patienten dessen Gefährdungsgrad einschätzen. Je stärker sich jedoch die Menschheit durchmischt, desto mehr werden die Mediziner auf die Untersuchung des Erbguts selbst zurückgreifen müssen, um das individuelle Erkrankungsrisiko zu bestimmen.

Römern vertrieben wurden. Um 800 war das Römische Reich jedoch längst untergegangen. Somit entstand die Gründermutation aller Wahrscheinlichkeit nach im Nordwesten Europas und breitete sich später nach Süden und Osten aus.

Anthropologen, allen voran Luigi Cavalli-Sforza von der Universität Stanford (Kalifornien), hatten in der Vergangenheit andere Typen von DNA-Varianten genutzt, um die Migration von Menschengruppen nachzuvollziehen. Gründermutationen erweitern nun jedoch DNA-Studien um eine zusätzliche Dimension, denn die kalibrierte Länge des Haplotyps datiert die initiale Mutation, und die ermittelte Häufigkeit in der Bevölkerung erfasst die geografische Ausbreitung der Nachfahren des Gründers.

Molekulargenetische Indizien in jedem von uns belegen, dass wir letztlich alle einer einzigen großen Menschheitsfamilie angehören, die durch das gemeinsame Erbe unseres Genoms verbunden ist. Analysen von Gründermutationen bestätigten dabei nicht nur die »Out of Africa«-Hypothese, sie haben auch die gemeinsame Herkunft verschiedener scheinbar nicht enger verwandter Gruppen aufgedeckt. Aktuelle Untersuchungen von David B. Goldstein von der Duke-Universität in Durham (North Carolina) zum Beispiel ergaben eine unerwartete genetische Verwandtschaft zwischen Kelten und Basken.

Gründermutationen und ihre Haplotypen werden sicherlich weitere derartige Beziehungen offenbaren und neue Einblicke liefern, wo verschiedene Bevölkerungsgruppen herstammen und wie sie dort hingelangten, wo sie heute leben. Zugleich werden auftauchende unerwartete Verwandtschaftsverhältnisse wohl auch ein tieferes Verständnis für die gemeinsamen Wurzeln des menschlichen Stammbaums schaffen. ◁

Dennis Drayna, 1981 an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) promoviert, entdeckte während seiner 14-jährigen Tätigkeit in der Biotech- Industrie mehrere menschliche krankheitsrelevante Gene. Seit 1996 arbeitet er an den Nationalen Gesundheitsinstituten in Bethesda (Maryland) und ist derzeit Sektionsleiter des Instituts für Taubheit und andere Kommunikationsstörungen. Die Suche nach Familien mit einer Häufung solcher Erkrankungen führte ihn in acht verschiedene Länder auf vier Kontinenten.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Ein neues Modell der *Homo*-Evolution? Von I. Tattersall in: SDW 6/ 1997, S. 64

Natural selection and molecular evolution in PTC, a bitter-taste receptor gene. Von S. Wooding et al. in: American Journal of Human Genetics, Bd. 74, Nr. 4, S. 637, 2004

The great human diasporas: The history of diversity and evolution. Von L. Cavalli-Sforza. Addison Wesley 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

STRASSENBAU

Schwer belastbares Sandwich

Sollen Straßen dem täglichen Verkehr standhalten, kommt es auf die richtige Asphaltmischung an.

Von Stefanie Reinberger und Klaus-Dieter Linsmeier

Egal ob wir radeln oder skaten, mit dem Auto oder per pedes unterwegs sind – meist bewegen wir uns auf asphaltierten Wegen. Ihr Aufbau ist durch technische Regelwerke vorgegeben. Auf dem eingeebneten und maschinell verfestigten Erdboden werden Kies oder Schotter als Frostschutz- und Drainageschicht aufgebracht und auf zwanzig bis sechzig Zentimeter Dicke komprimiert. Auf diesen Untergrund kommt anschließend die Asphaltbefestigung. Auf Radwegen und sehr wenig befahrenen Strecken reicht eine einzige, etwa zehn Zentimeter starke Lage aus. Muss die Fahrbahn jedoch mehr aushalten, ist ein Sandwich aus Asphalttrag-, -binder- und -deckschicht stabiler.

Asphalt ist ein Verbundmaterial, bestehend aus dem Bindemittel Bitumen und Mineralstoffen wie Splitt, Kies und Sand, aber auch aus Schlacken aus der Metallverhüttung. Die drei Schichten unterscheiden sich nicht zuletzt in der Korngröße dieser Zuschlagstoffe.

Auf der Deckschicht rollen die Reifen ab, deshalb muss ihre Oberfläche eben und griffig sein. Aus diesem Grund haben die Mineralstoffe in dieser wenige Zentimeter dicken Lage maximal acht bis elf Millimeter Durchmesser. Eine Ausnahme bilden so genannte offenporige Asphalte, auch unter dem Markennamen Flüsterasphalt bekannt. Deutlich mehr grobe als feine Gesteinskörnungen sorgen hier für ein Netz von Hohlräumen, die das Abrollgeräusch eines Fahrzeugs verringern. Gleichzeitig nimmt dieser Belag auch Regenwasser auf und reduziert so Aquaplaning und Sprühfahnen. Auf einer darunterliegenden Versiegelung fließt das Wasser ab.

Die so genannte Tragschicht nimmt die Belastungen durch den Verkehr auf und verteilt sie auf die Unterlage aus Kies und Schotter. Sie ist mindestens acht Zentimeter dick, bei viel befahrenen Strecken für den Schwerverkehr erreicht sie bis zu 22 Zentimeter Stärke. Um ihr die notwendige Festigkeit zu verleihen, kommen gröbere Mineralstoffe mit 16 bis 32 Millimeter Durchmesser zum Einsatz.

Zwischen Trag- und Deckschicht vermittelt die Asphaltbinderschicht, die zudem Unebenheiten der Tragschicht ausgleicht. Messungen der in Fahrtrichtung auftretenden Schubkräfte zeigen, dass hier in der Binderschicht die größten Schubspannungen auftreten. Je nach zu erwartendem Verkehrsaufkommen wird diese Lage mit vier bis zehn Zentimetern Stärke ausgelegt.

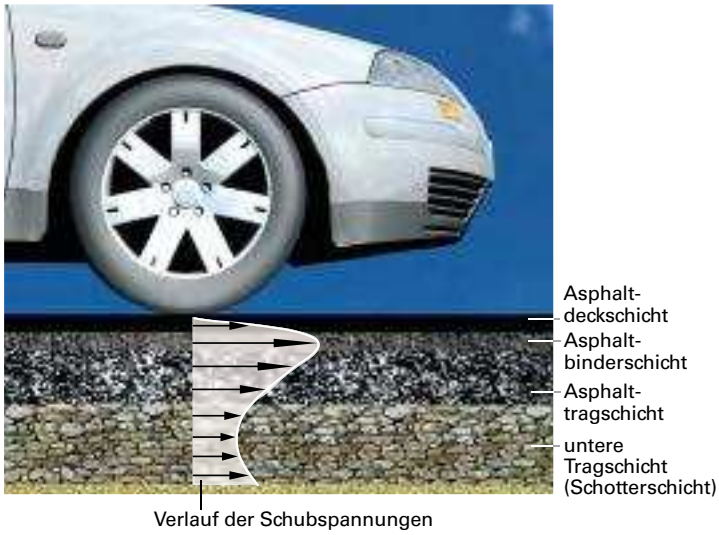
Asphalt kommt vorgefertigt auf die Baustelle. Der Hersteller mischt die Mineralstoffe dem Bindemittel Bitumen bei, das bei 160 bis 250 Grad Celsius flüssig wird. Heiß wird das Material mit einem so genannten Fertiger ausgebracht (siehe Grafik S. 41). Eine stählerne Bohle sorgt dafür, dass die Oberfläche eben ist, unter Umständen verdichtet sie den frisch aufgetragenen Asphalt durch Vibrationen. Das Repertoire der Baumaschinen umfasst außerdem: verschiedene Walzen, die einzelne Schichten gegebenenfalls weiter komprimieren; Spritzrampen, die ein Mittel ausbringen, das die Haftung zwischen den Schichten verbessert; und Kerbmaschinen, mit denen die Unterlage vorab gereinigt wird.

Um die Stabilität und Beständigkeit bei Temperaturschwankungen zu verbessern, mischt man das Bitumen des Deckschichtasphalts mit Polymeren: Indem diese miteinander vernetzen, fördern sie die Elastizität – immerhin soll eine Straße Jahrzehnte halten. Für die Tragschicht streben Planer sechzig Jahre, für die Bindeschicht dreißig und für die Fahrbahndecke immerhin 15 Jahre an.

Um die Arbeitsbedingungen im Straßenbau zu verbessern, erproben Ingenieure so genannte Niedrigtemperaturasphalte. Wachszusätze im Bitumen sollen eine Verarbeitung bei niedrigeren Temperaturen ermöglichen. Das würde Energie sparen und gesundheitsschädliche Ausgasungen reduzieren.

Was von solchen neuen Asphaltmischungen zu erwarten ist, testen Ingenieure etwa beim Bundesamt für Straßenbau (BASt) in Bergisch Gladbach. Dazu dienen ihnen auch Modellstraßen in Versuchshallen. Zwischen den einzelnen Schichten platzieren sie Sensoren, um Druck, Dehnung und Temperatur etwa bei der Überfahrt schwerer Lkws zu messen. Außerdem lässt sich ein solcher Aufbau fluten oder auf Frosttemperaturen abkühlen. Um die Belastbarkeit über viele Jahre hinweg im Zeitraffer zu untersuchen, hämmern hydraulische Impulsgeber darauf ein. Doch erst der Einsatz in der Praxis zeigt, ob die Mischungen halten, was sie im Test versprochen haben. ◁

Die promovierte Biologin **Stefanie Reinberger** arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg. **Klaus-Dieter Linsmeier** ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



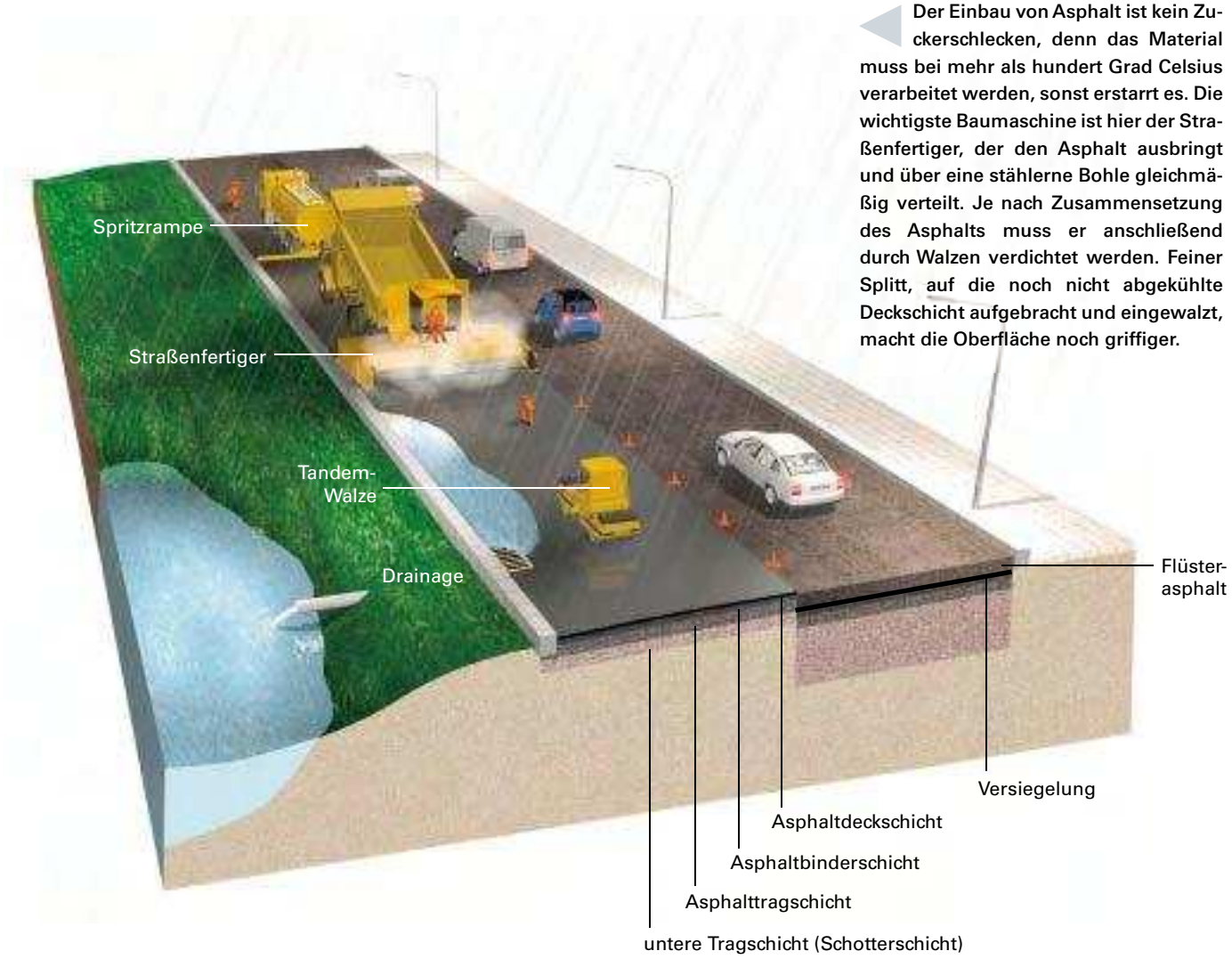
WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Natürliches Bitumen** entsteht in erdöldurchsetzten Gesteinsschichten. Es wurde in Mesopotamien bereits 3000 v. Chr. eingesetzt, etwa um Wasserspeicher undurchlässig zu machen und Ziegel oder Mosaikkacheln zu kleben. Davon zeugt auch die Bibel, die den Baustoff im Zusammenhang mit der Arche Noah, dem Turmbau zu Babel und dem Körbchen des kleinen Moses erwähnt. Als Straßenbelag kamen bitumenhaltige Gemische erstmals im 18. Jahrhundert in Europa zum Einsatz. Das Asphaltbindemittel fällt heute bei der Erdölverarbeitung als Nebenprodukt an.

▶ **Dringt Wasser in Hohlräume** des Asphalts ein, kann Frost dann feine Risse bilden. Eine solche Wirkung hat auch der Sauerstoff aus der Luft, der das Bitumen oxidiert und dadurch spröde macht. Mechanische Beanspruchung vergrößert die Schäden, bis Teile einer Straßendecke ausbrechen. Ist deren Funktionalität nicht mehr gewährleistet, wird eine Reparatur erforderlich. Dazu muss die Decke teilweise abgetragen werden, zum Beispiel durch Fräsen. Fugenkonstruktionen verbinden die neue Asphaltdecke elastisch mit der noch vorhandenen.

▶ **Teer und Teerpeche** ähneln zwar in ihrem Aussehen dem Bitumen, werden aber aus Stein- und Braunkohle, seltener auch aus Holz oder Torf gewonnen. Im Straßenbau kommen sie auf Grund ihrer gesundheitsschädigenden Dämpfe bei der Verarbeitung und ihrer umweltschädigenden Bestandteile nicht mehr zum Einsatz.

BEIDE GRAFIKEN: SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: GEORGE RETSECK



Der Einbau von Asphalt ist kein Zuckerschlecken, denn das Material muss bei mehr als hundert Grad Celsius verarbeitet werden, sonst erstarrt es. Die wichtigste Baumaschine ist hier der Straßenfertiger, der den Asphalt ausbringt und über eine stählerne Bohle gleichmäßig verteilt. Je nach Zusammensetzung des Asphalts muss er anschließend durch Walzen verdichtet werden. Feiner Splitt, auf die noch nicht abgekühlte Deckschicht aufgebracht und eingewalzt, macht die Oberfläche noch griffiger.

Um die anfallenden Belastungen aufzunehmen, erfordern Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen drei Asphaltschichten. Dabei wirkt in der Binderschicht zwischen Deck- und Tragschicht die höchste Schubspannung.

150 Jahre Trockenheit

Waren langjährige Dürren der Grund für den Niedergang der Maya? Neue Indizien für die umstrittene These liefert das Meer.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Von Larry C. Peterson
und Gerald H. Haug

Obwohl sie nie das Rad und die Metallverarbeitung erfunden hatten, schufen die Maya Pyramiden und Tempel, erbauten Metropolen und kleine zeremonielle Zentren im Tiefland der Halbinsel Yukatan (heute teilweise Südmexiko, Guatemala und ganz Belize). Von Observatorien aus verfolgten sie den Aufgang der Venus und anhand ihrer Himmelsbeobachtungen entwickelten die Maya einen Kalender des Sonnenjahres mit 365 Tagen. Sie ersannen eine eigene Mathematik, die auf der Grundzahl Zwanzig basierte und bereits die Null kannte. In einer Hieroglyphenschrift aus vielen hundert Zeichen dokumentierten ihre Schreiber den Vollzug wichtiger Rituale ebenso wie den Sieg über ihre Feinde.

Ihren Zenit erreichte diese Hochkultur in der so genannten Klassischen Periode (250–950 n. Chr.). Bis zum 9. Jahrhundert dürften vier bis zwölf Millionen Menschen auf Yukatan gelebt haben, doch dann brach diese Zivilisation zusammen. Die Maya verließen ihre Zentren, die beeindruckenden Bauwerke verfielen, nur wenige hunderttausend Menschen überlebten auf der Halbinsel. Nach wie vor ist dieser Kollaps eines der großen Rätsel der Archäologie.

Es gibt nicht wenige Theorien über die Ursachen. Sie reichen von kriegerischen Auseinandersetzungen der Stadtstaaten – es gab nie einen ganz Yukatan umfassenden Mayastaat, sondern stets mehrere konkurrierende Zentren wie Chitchén Itzá oder Tikal – bis zu einer Invasion, vom Ausbruch einer tödlichen Seuche bis zu starker Abhängigkeit von wenigen Feldfrüchten, vom Verlust fruchtbarer Böden durch Erosion bis zur Annahme eines ungünstigen Klimawandels. Vermutlich haben mehrere dieser Faktoren in einem komplexen Zusammenspiel die Lebensbedingungen im Tiefland drastisch verschlechtert. Allerdings mehren sich seit wenigen Jahren die Anzeichen dafür, dass gegen Ende der Klassischen Periode tatsächlich ausgeprägte Dürreperioden auftraten.

Hochkultur im Karstgebiet

Angesichts des üblichen Klischees von Mayaruinen, die in dichten Dschungeln verborgen liegen, überrascht es sicher zu lesen, dass Yukatan in den Wintermonaten eine Wüste ist. Die Vegetation dort kann nur existieren, solange die Sommerregen ergiebig sind, und diese variieren beträchtlich über die Halbinsel: Von gerade mal 500 Millimetern an der Nordküste bis zu 4000 Millimetern in einigen südlichen Landstrichen; nur dort kann sich dschungelartige Vegetation halten. Neunzig Prozent des gesamten Niederschlags fallen von Juni bis September, während die Zeit von Januar bis Mai ausgesprochen trocken ist.

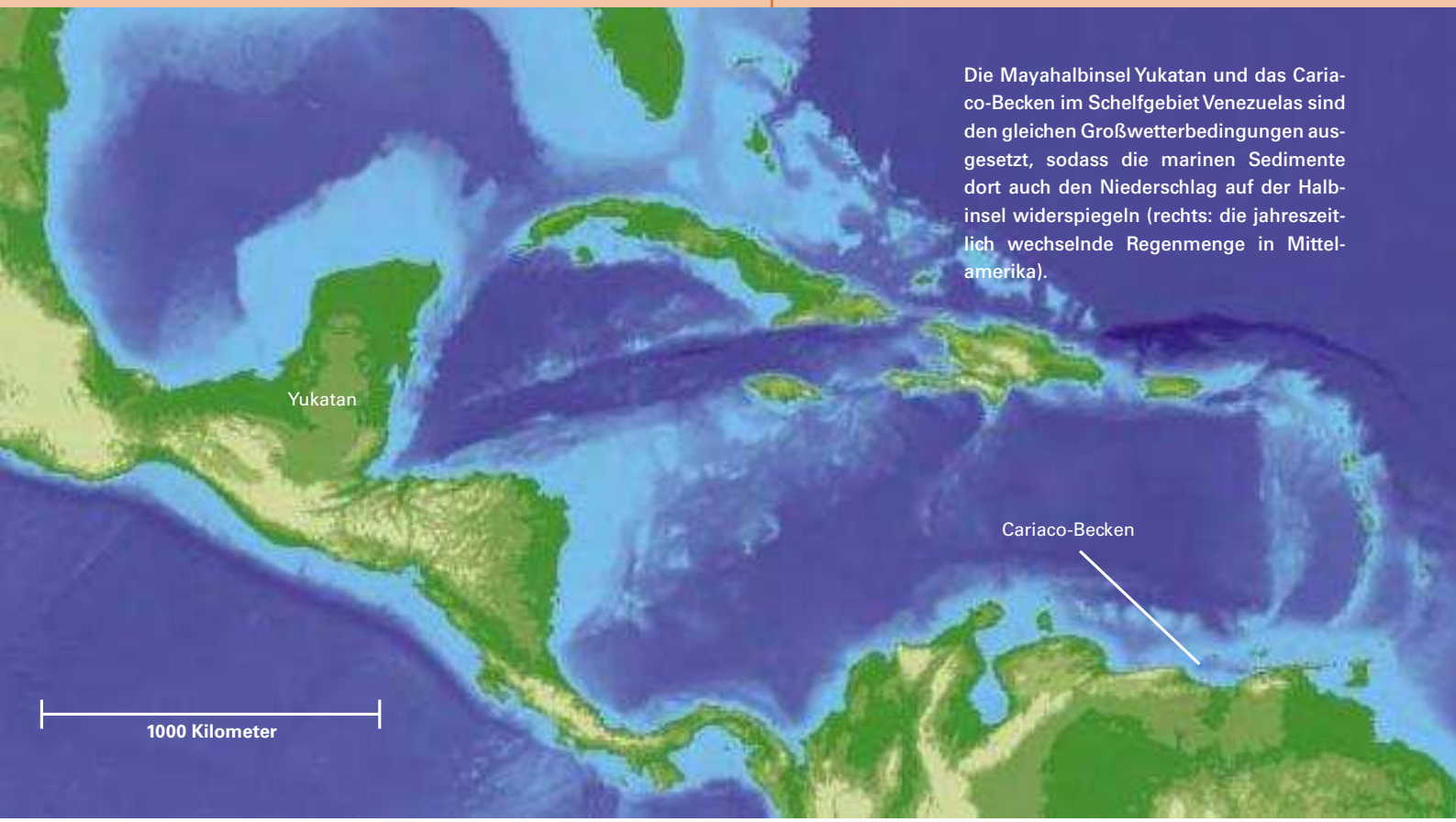
Dieser ausgeprägte Nass-trocken-Kontrast ergibt sich aus der jahreszeitlichen Wanderung der Regenwolken auf Grund der so genannten innertropischen Konvergenz: Am Äquator erwärmt sich die Luft und steigt auf, das resultierende Tiefdruckgebiet zieht Luft aus kälteren

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Gebieten im Norden und Süden nach sich; dies wird als Konvergenz bezeichnet, die Luftbewegung zum Äquator als Passatwinde. Die aufsteigende Luft kühlt ab, sodass Feuchtigkeit schließlich kondensiert und abregnet. Weil diese Niederschlag bringende Zone aber in den Wintermonaten weit nach Süden wandert, herrscht dann Trockenheit auf Yukatan und im nördlichen Südamerika; erst im Sommer regnet es wieder in Südmexiko und der südlichen Karibik.

Mit diesen jahreszeitlichen Härten mussten die Maya umgehen lernen. Umso mehr, als der Felssockel Yukatans aus Kalkstein besteht. Wer einmal Urlaub in einer der Karstlandschaften Europas gemacht hat, sei es in den Alpen oder in Jugoslawien, konnte sehen, was das bedeutet: Wasser versickert und löst den Kalk, bildet somit Höhlen, aber auch unterirdische Flüsse und Seen, während oberirdisch Trockenheit herrscht. Deshalb konnten die Maya ihre Siedlungen nicht an Flussläufen oder Seen errichten wie Kulturen in der Alten Welt. Selbst so bedeutende Stadtstaaten wie Tikal, Caracol und Calakmul waren auf eine gut funkti- ▷

▲ Geheimnisvolle Ruinen in üppig feuchten Dschungeln – das ist das Bild, das Expeditionen des 19. Jahrhunderts von den einstigen Prachtbauten der Maya zeichneten. Tatsächlich aber ist das Tiefland der Halbinsel Yukatan im Winter und im Frühling sehr trocken.



Die Mayahalbinsel Yukatan und das Cariaco-Becken im Schelfgebiet Venezuelas sind den gleichen Großwetterbedingungen ausgesetzt, sodass die marinen Sedimente dort auch den Niederschlag auf der Halbinsel widerspiegeln (rechts: die jahreszeitlich wechselnde Regenmenge in Mittelamerika).

DAVE SCHNEIDER

▷ onierende Wasserspeicherung angewiesen. In vielen Städten lenkten Kanäle das Regenwasser in natürliche oder künstliche Zisternen, die mit einem wasserundurchlässigen Verputz ausgestattet waren. Manche bauten sie auf Hügelkuppen, sodass das kostbare Nass der Schwerkraft folgend in ein komplexes Bewässerungssystem abfließen konnte. Doch trotz aller hydrologischen Kenntnisse galt: Blieben die Sommerregen aus, drohten Wasserknappheit und in direkter Folge auch Hunger.

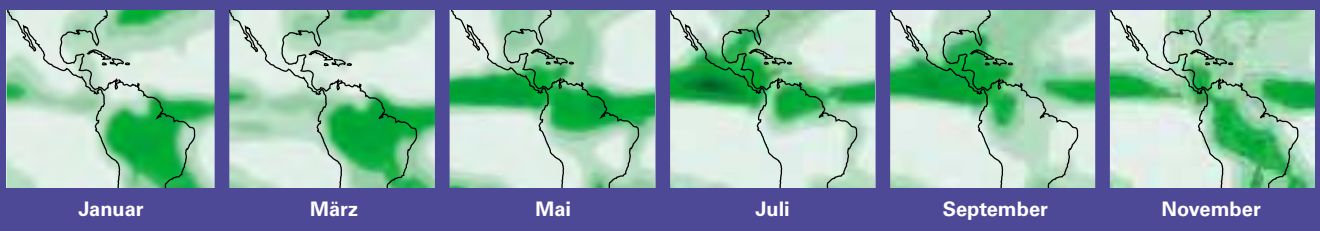
Der Privatarchäologe Richardson B. Gill veröffentlichte im Jahr 2000 das Buch »The Great Maya Droughts« (etwa »Die großen Mayadürren«) und entfachte damit die Diskussion über die Ursachen des Niedergangs dieser Hochkultur (Gill erbte nach seiner akademischen Ausbildung ein florierendes Unternehmen in San Antonio, Texas, sodass er sich der Forschung ohne Anbindung an eine Hochschule, sozusagen als Hobby widmen kann; *die Redaktion*). Er hatte eine Vielzahl von Informationen gesammelt: über die Zusammenhänge von Wetter und Klima in jüngerer Zeit, zu Trockenheiten und Hungersnöten in der Geschichte, und was immer er an Daten über das Klima in lang zurückliegenden Kulturen in Erfahrung bringen konnte, sei es aus archäologischen oder geologischen Quellen.

Um die Bedeutung des wasserdurchlässigen Kalksteins zu unterstreichen, zitierte Gill beispielsweise den Bischof von Yukatan, Diego de Landa, der 1566 schrieb: »Die Natur arbeitet in diesem Lande ganz anders, was Flüsse und Quellen angeht: Im Rest der Welt fließen sie auf dem Lande, hier aber auf geheimen Wegen unter der Oberfläche.«

Gipsschichten als Indikator für Trockenheit

Die wichtigsten Argumente für seine These, der Zusammenbruch der klassischen Mayazivilisation sei eine Folge von Dürrezeiten, lieferten ihm David A. Hodell, Jason H. Curtis, Mark Brenner und andere Geologen der Universität Florida. Diese publizierten 1995 eine Analyse der Bohrkerne, die sie aus den Sedimentablagerungen des Chichancanab-Sees (Mexiko) gewonnen hatten. Wie ein Archiv bewahren die im Lauf der Jahrtausende aufeinander wachsenden Schichten Informationen über die jeweils herrschenden Umweltbedingungen, man muss nur verstehen sie zu lesen. Die Forscher entdeckten, dass die wasserärmste Phase der letzten 7000 Jahre tatsächlich in die Zeit zwischen 800 und 1000 fiel. Anhand neuer Proben haben sie diesen Befund mittlerweile präzisiert. (Das Wasser des Chichancanab-Sees ist nämlich fast mit Kalziumsulfat gesättigt. In Trockenzeiten, wenn die Verdunstung überhand nimmt, fällt er als Gips aus und bildet im Bohrkern erkennbare Schichten. Im Mai 2001 erklärten die Wissenschaftler, dass sich solche Ablagerungen offenbar im Rhythmus von 208 Jahren wiederholten. Das entspricht fast dem Zyklus der Sonnenaktivität mit 206 Jahren. Tatsächlich scheinen die Gipsablagerungen mit dem Maximum des Sonnenzyklus zusammenzufallen. Allerdings erreicht dann nur ein Promille mehr an Energie die Erde, sodass ein noch unbekannter Mechanismus verstärkend gewirkt haben muss.

Unsere eigene, inzwischen abgeschlossene Forschung ergänzt derartige Untersuchungen von einer vielleicht unerwarteten Seite her. In einiger Entfernung zur Nordküste Venezuelas senkt sich der Festlandsockel Mittelamerikas und formt das Cariaco-Becken. Bis zu ei-



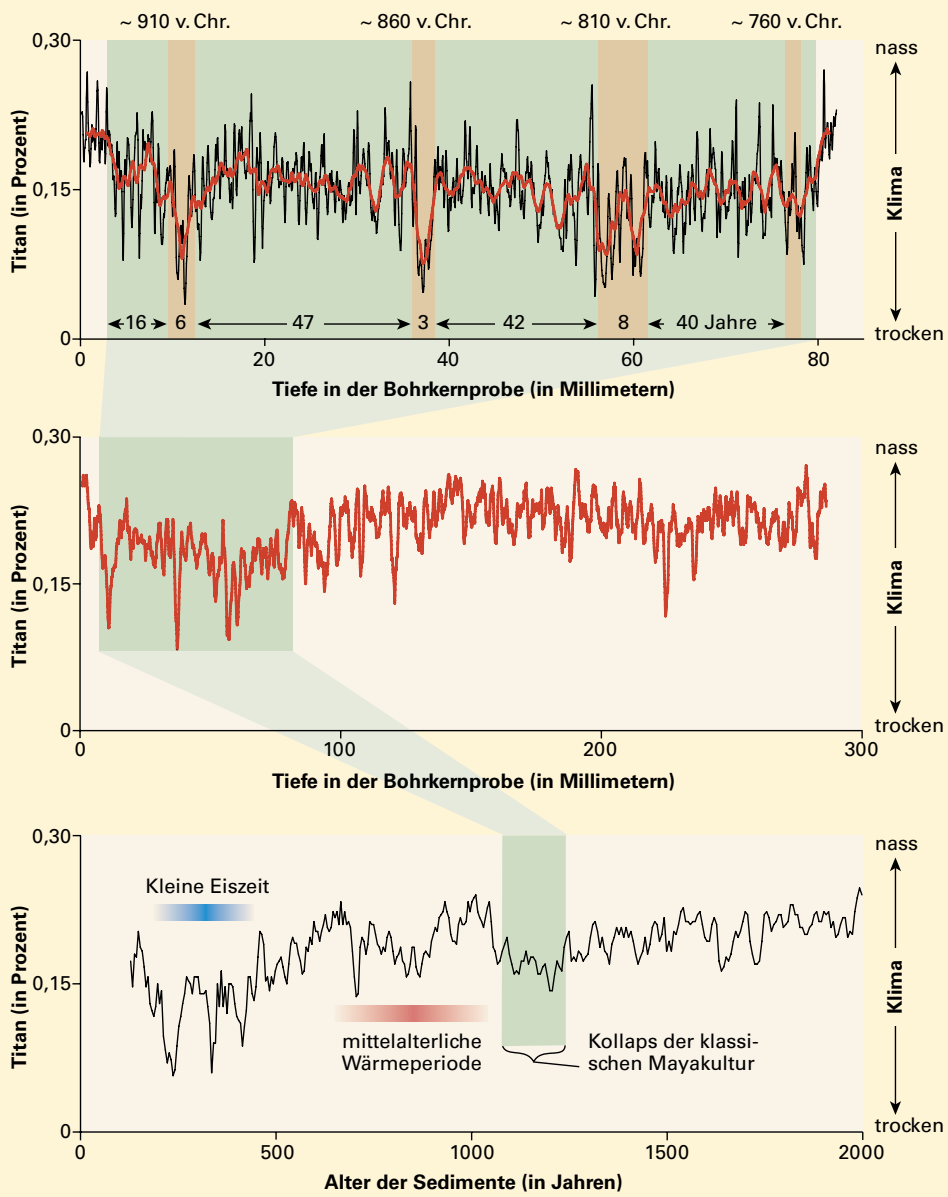
DAVE SCHNEIDER

nem Kilometer tief, doch umgeben vom flachen Kontinentalhang und verschiedenen Untiefen bildet es eine natürliche Falle für Sedimente. Mehr noch verhindert ein seichter Auslauf, dass sich das Wasser der tiefen Beckenbereiche mit dem des offenen Ozeans durchmischt. Schon seit dem Ende der letzten Eiszeit vor etwa 14 500 Jahren herrscht dort deshalb Sauerstoffarmut, sodass am Meeresboden lebende Organismen, die bei ihrer Nahrungssuche Sedimente aufwühlen, nicht vorkommen. Mit anderen Worten: Die Schichtabfolge der Sedimente im Zentrum des Cariaco-Beckens ist seit Jahrtausenden ungestört.

In den Bohrkernen zeigt sich ein auffälliges Muster aus abwechselnd hellen und dunklen Streifen. Deren Ursprung lässt sich leicht verstehen. Während der Winter- und Frühlingsmonate bringen starke Passatwinde kaltes, an Nährstoffen reiches Wasser aus den Tiefen des Ozeans an die Oberfläche vor der Nordküste Venezuelas (so genannter Küstenauftrieb). Dadurch vermehrt sich das Plankton – einzellige, kalkschalige Algen und Tiere (Coccolithophoriden beziehungsweise Foraminiferen). Sterben diese Kleinstlebewesen ab, sinken ihre festen Überreste zu Boden und bilden jene helle Schicht. Während des regenreichen Sommers hingegen wird der Küstenauftrieb und damit die Nährstoffzufuhr für das Plankton unterbrochen, während andererseits Flüsse nun Schlamm ins offene Meer spülen – dies ist die dunkle, vorwiegend aus Tonmineralen bestehende Lage. Beide zusammen ergeben im Cariaco-Becken eine geologische »Uhr«, die auf mindestens ein Jahr genau geht (fachlich: Jahreslagen, Warven). Ein Zeitmesser, der auch für Yukatan gilt, denn beide Gebiete unterliegen in gleicher Weise der Wanderung der innertropischen Konvergenzzone.

Unsere Forschung begann 1996, als das Forschungsschiff Joides Resolution im Rahmen des internationalen Ozean-Tiefbohrprogramms (Ocean Drilling Program, ODP) zum Zentrum des Cariaco-Beckens aufbrach. Den Technikern ge- ▷

STEPHANIE FREESE



Messungen der Titankonzentration in den Sedimentschichten des Cariaco-Beckens spiegeln Zeiten üppiger Regenfälle und Phasen der Dürre wieder. Sie lassen sich auf Grund der globalen Klimaprozesse mit Warm- und Kaltzeiten in Europa in Verbindung bringen, aber auch mit dem Untergang der Maya, ja sogar mit den drei Phasen dieses Kollapses, wie sie der unabhängige Archäologe Richardson B. Gill postuliert.

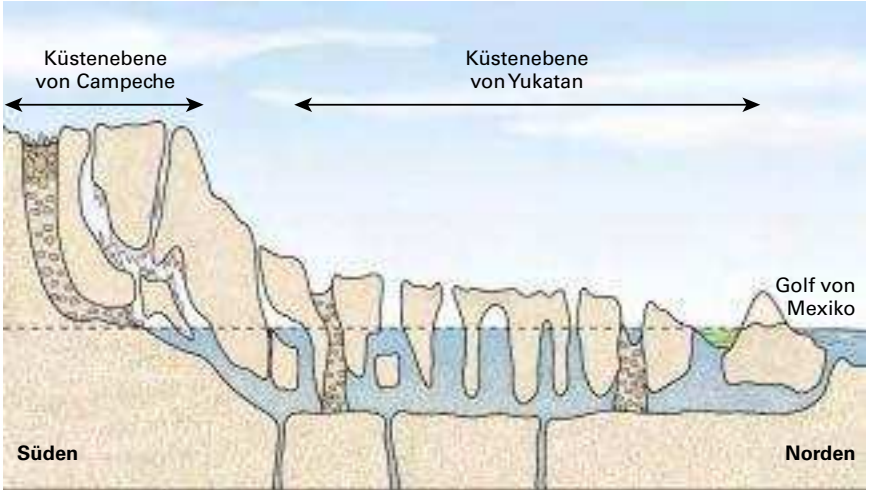
▷ lang es, dort einen 170 Meter langen Sedimentkern zu gewinnen. Das explizite Ziel der folgenden Analyse: die Veränderungen des tropischen Klimas in der fernen Vergangenheit zu erkunden. Ein wichtiger Aspekt dabei war, anhand der Konzentration mineralischer Körner auf die Menge an Regen zu schließen, der sie vom Festland abgewaschen hatte.

Dazu erprobten wir neue Verfahren, denn das Abzählen der Jahreslagen unter dem Mikroskop wäre in diesem Fall zu zeitaufwändig, ermüdend und dadurch auch fehleranfällig gewesen. Als besonders effizient erwies es sich, den Gehalt an Titan in einer Probe zu bestimmen, denn es wird mit Lehm und Schlamm vom Land ausgewaschen, hohe Konzentrationen sind also ein indirekter Hinweis auf große Regenmengen. Den Titangehalt wollten wir so einfach und effektiv wie möglich bestimmen, zudem ohne Zerstörung der Proben, wie eine chemische Analyse sie mit sich gebracht hätte. Das Verfahren der Röntgenfluoreszenz bietet all diese Vorteile: Das Material wird Röntgenstrahlung ausgesetzt, die das Element anregt, mit einer charakteristischen Wellenlänge zu leuchten. Die Intensität dieses Fluoreszenzlichts ist ein Maß für die Titankonzentration.

Für unsere Messungen benutzten wir einen speziellen Scanner der Universität Bremen; dort werden auch die Bohrkerne des Ozean-Tiefbohrprogramms gelagert. Wir untersuchten jeweils zwei Millimeter lange Abschnitte innerhalb eines Kernstücks, das bereits durch Radiokarbondatierung als interessant für unserer Fragestellung ausgedeutet worden war.

Was gleich ins Auge fiel, war ein sehr niedriges Titanvorkommen in Schichten, die vor 500 bis 200 Jahren abgelagert wurden. Dies entspricht der Periode der Kleinen Eiszeit in Europa. In Zentralamerika herrschte offenbar eine lange Phase mit relativ geringen Regenfällen, was sich mit historischen Berichten deckt. Offensichtlich blieb die innertropische Konvergenzzone damals auch im Sommer weit südlicher als heute. Wir fanden vergleichbare Abschnitte des Bohrkerns aber auch für die Zeit zwischen 800 und 1000 n. Chr., was sich mit den Befunden von David A. Hodell und seinen Kollegen an Seesedimenten deckt.

Deren These einer Superdürre über 100 oder gar 200 Jahre im Kernland der Maya fand bei den Archäologen nur geteilte Zustimmung. Denn ihre Funde sprechen dafür, dass der Kollaps der Mayazivilisation sowohl räumlich wie zeitlich unterschiedlich verlief. Wenn Trockenheit ein entscheidender Grund des Niedergangs gewesen war, dann musste sie die verschiedenen Zentren zu unterschiedlichen Zeiten betroffen haben, einige wenige im Norden der Halbinsel möglicherweise auch gar nicht.



STEPHANIE FREESE, NACH: RICHARDSON GILL

Sedimentgeschichte mit extremer Auflösung

Wir hofften deshalb, nach der ersten Untersuchung der Sedimentkerne aus dem Cariaco-Becken die optimalen Bedingungen, die uns die ungestörte Schichtabfolge gibt, dahingehend zu nutzen, die Klimaentwicklung zeitlich noch feiner aufzulösen. Leider waren wir aber beim Bremer Scanner bereits an die Grenzen gestoßen. Doch Detlef Günther und Beat Aeschlimann von der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich (ETHZ) hatten ein Mikroröntgenfluoreszenz-Gerät entwickelt, das sie uns freundlicherweise zur Verfügung stellten. Dort haben wir im Jahr 2002 die Titankonzentration in Abschnitten von nur noch 50 Mikrometer Länge analysiert; das entspricht in der statistischen Auswertung etwa zwei Monaten in der Ablagerungsgeschichte des Cariaco-Beckens, eine unglaubliche Genauigkeit.

Wir bearbeiteten zwei Proben des Bohrkerns, die gemeinsam den Zeitraum von 200 bis 1000 abdecken. Dabei beschränkten wir uns auf die Schichten, die mit dem Ende der klassischen Periode korrespondierten. In diesem Intervall fanden wir vier verschiedene Titanminima, die für drei- bis neunjährige Dürren in einer ohnehin trockenen Phase sprachen; dazwischen lagen 40 bis 50 Jahre. Allerdings lassen sich diese Sedimentschichten nicht ganz genau datieren. Radiokarbonmessungen legen sie auf die Jahre 760, 810, 860 und 910 fest, doch mit einer Ungenauigkeit von dreißig Jahren.

Die Archäologen sind sich darin einig, dass der Niedergang der Maya im südlichen und zentralen Tiefland Yukatans seinen Anfang nahm und erst hundert Jahre oder noch später Zentren der nördlichen Gebiete erreichte. Dieses Muster ist der heute üblichen von Süden nach Norden zunehmenden Trockenheit gerade entgegengesetzt. Das wurde von einigen Mayaexperten als Argument angeführt, warum Dürren nicht der ausschlaggebende Faktor für den Kollaps gewesen sein konnten. Doch dabei berücksichtigen sie nicht, dass der Zugang zu natürlichen Wasservorkommen in der Küstenebene und vor allem im Norden Yukatans das Überleben auch in langen Dürrephasen sicherstellen konnte.

Denn dort gab und gibt es zahlreiche wassergefüllte Karstlöcher, also Höhlen, deren Decken eingebrochen sind und die als natürliche Zisternen fungieren können (siehe Bild rechts). Je weiter man sich aber landeinwärts bewegt, desto höher steigt das Bodenniveau an und der Abstand zum Grundwasserspiegel wächst (siehe Grafik oben). Die Maya verfügten schlichtweg nicht über die notwendigen Techniken, sich durch Brunnen den Zugang zum Wasser zu verschaffen. Sie waren auf die künstlich angelegten Speichersysteme und den Sommerregen angewiesen. Eine Trockenheit musste sich unter diesen Bedingungen wesentlich härter auswirken.

Richardson B. Gill postulierte, dass sich der Kollaps in drei Phasen vollzog – zwischen 760 und 810 die erste, bis 860

In der Küstenebene von Yukatan erlauben eingestürzte Karsthöhlen mitunter, an den Grundwasserspiegel zu gelangen. Der Stich einer Expedition von 1844 zeigt, wie schwierig und gefährlich so ein Unterfangen oft war. Je weiter landeinwärts aber eine Siedlung angelegt wurde, desto tiefer lag der Grundwasserspiegel, wie die Grafik links verdeutlicht.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

die zweite und die letzte schließlich bis 910 –, wobei es regional deutlich unterschiedliche Ausprägungen gab. Diese Zeitgrenzen leitete er von den letzten Datumsangaben auf Mayastelen ab.

Drei Phasen des Untergangs

Weil diese Daten mit strengen Kälteeinbrüchen in Europa gut übereinstimmen (die anhand von Baumringen in Schweden ermittelt wurden), glaubt Gill an eine klimatische Kopplung – was sich auf Yukatan als Dürre auswirkte, machte sich in höheren Breitengraden als drastischer Temperaturrückgang bemerkbar. Eine ähnliche Analogie haben wir, wie schon erwähnt, ebenfalls beobachtet.

Gills Argumente wurden in Fachkreisen heftig diskutiert. Breite Ablehnung erfuhr beispielsweise seine Annahme, die Datumsangaben der Stelen wären exakte Kriterien, wann die jeweilige Stadt verlassen wurde. Zudem berücksichtigte Gill nur die größten Stätten, die Entwicklung in den kleineren lokalen Zentren blieb bei seiner Analyse außen vor. Trotz aller berechtigter Zweifel: Unsere Analyse der Meeressedimente bestätigt die Drei-Phasen-Theorie erstaunlich gut.

Demnach wäre um 760 tatsächlich die Regenmenge abrupt und stark zurückgegangen und hätte in den kommenden vierzig Jahren langsam weiter nachgelassen, um dann in eine zehn oder mehr Jahre dauernde schwere Dürre überzugehen. Das entspricht dem Ende der ersten »Gill«-Phase um 810. Damals verließen die Maya die Zentren des westlichen Tieflands, wo es kaum Zugang zu Grundwasserreservoiren gibt.

Elite ohne Weitsicht

Auch das Ende der zweiten Phase spiegeln die Meeressedimente durch einen sehr niedrigen Titangehalt über drei bis vier Jahre. Damals traf es die Siedlungen des südöstlichen Tieflands. Vielleicht hatten die Menschen dort dank einiger Frischwasserlagunen (in denen Grundwasser austritt) die erste Phase überstehen können, doch nun waren diese Vorkommen wohl erschöpft.

Schließlich markiert ein starker Rückgang der Titankonzentration in unseren Proben für die Zeit um 910 den endgültigen Kollaps am Ende des dritten Zeitabschnitts. Damals gingen auch die Städte des zentralen und des nördlichen Tieflands zu Grunde. Unseren Messungen nach dauerte diese Dürre immerhin fünf bis sechs Jahre. Erst danach stieg der Gehalt an unserem Indikator Titan wieder an, die Regenmengen erreichten vermutlich das Niveau von vor 760, doch für die Maya des Tieflands kam diese Entwicklung zu spät.

Dennoch: Obwohl die Übereinstimmung unserer Daten mit den Thesen von Gill wirklich sehr gut ist, wissen wir natürlich, dass ein so komplexes Phänomen wie der Niedergang einer Hochkultur nicht eine einzige Ursache haben kann. Viele Experten gehen davon aus, dass eine bis in das 9. Jahrhundert auf vier bis zwölf Millionen Menschen angewachsene Bevölkerung bereits am Limit der verfügbaren Ressourcen lebte, diese durch ▷

EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: RICHARDSON GILL

Der amerikanische Archäologe Richardson B. Gill postuliert, dass der Untergang der klassischen Mayakultur in drei Phasen verlaufen sei. Um das Jahr 810 (grün) seien die ersten Städte verlassen worden, etwa 50 Jahre später folgte die nächste Phase (braun), um 910 dann die dritte (blau).

▷ Entwaldung und Übernutzung landwirtschaftlicher Flächen sogar zerstörte. Hinzu kam die ständige Belastung durch die Kriege zwischen den Stadtstaaten. Die Bonner Altamerikanisten Hanns Prem und Nikolai Grube haben überdies in der Provinzstadt Xkipché nachweisen können, dass die Eliten offenbar auf all diese Probleme ohne Weitsicht reagierten.

Sie investierten zum Beispiel in den Bau repräsentativer Bauten und Tempel, nicht aber in die Anlage von Terrassen zur Erweiterung der landwirtschaftlich nutzbaren Flächen (siehe dazu auch Spektrum der Wissenschaft 12/2002, S. 38). Manche Forscher glauben, dass Klimaveränderungen wie Dürren das ihre dazu beitragen können, solche Krisen zu verschärfen. Trockenheit könnte also die Mayazivilisation destabilisiert haben. Diese These vertritt auch der kalifornische Physiologe Jared Diamond in seinem aktuellen Bestseller »Kollaps. Warum manche Gesellschaften überleben oder untergehen«.

Einige Archäologen haben darauf hingewiesen, dass die Kontrolle von Wasserreserven eine Quelle der Macht gewesen sein könnte, die den Mayaeliten Autorität verschaffte. Gelang es ihnen dann aber in Zeiten der Dürre nicht, die Bevölkerung ausreichend zu versorgen, verloren sie die Legitimation der Herrschaft. In der ersten Phase (nach Gill) der 150 Jahre dauernden Zeit immer wiederkehrender Dürren wanderten viele Gruppen wohl aus dem westlichen Tiefland Richtung Norden und Osten, um neue Wasservorräte zu finden; doch weil die Bevölkerung in den guten Zeiten anwuchs, hatte das Land schließlich keine solchen Optionen mehr zu bieten.

Die Kombination geologischer Archive mit archäologischen und historischen Quellen ermöglicht es, die Reaktionen antiker Gesellschaften auf Veränderungen des Klimas nachzuvollziehen. Noch ist dies ein sehr neuer Ansatz, doch er brachte in den letzten Jahren immer wieder verblüffende Erkenntnisse. Zum Beispiel verraten auch Analysen von Baumringen im amerikanischen Südwesten, dass dort zwischen 1275 und 1300 eine ausgeprägte Trockenheit herrschte – möglicherweise eine Ursache für das Verschwinden der Anasazi, eines durch seine in die Steilwände des Colorado-Plateaus gebauten Pueblos bekannten Indianervolks (siehe den Beitrag auf S. 56).

Der Zusammenbruch des Akkadischen Reichs in Mesopotamien vor 4200 Jahren, der Niedergang der Mochica-Kultur an den Küsten Perus vor 1500 Jahren und das Ende der Tiwanaku-Zivilisation im Hochland Boliviens und Perus vor einem Jahrtausend – all diese Entwicklungen lassen sich heute mit lang andauernden Dürren in Verbindung bringen. Mögen auch in allen diesen Fällen noch andere Faktoren eine Rolle gespielt haben – Kriege, Überbevölkerung, Umweltzerstörung –, so hatte doch stets eine Klimaverschlechterung entscheidenden Anteil am Untergang früher Hochkulturen. Und das ist angesichts der heute zu beobachtenden globalen Erwärmung alles andere als eine rein akademische Erkenntnis. ◁

Larry C. Peterson lehrt Meeresgeologie und Geophysik an der Universität Miami. Der Geologe **Gerald H. Haug** leitet die Abteilung Klimadynamik und Sedimente am GeoForschungsZentrum in Potsdam und lehrt an der Universität Potsdam.

© American Scientist (www.americanscientist.org)

Kollaps. Von Jared Diamond. Verlag S. Fischer, Frankfurt a. M., 2005

The great Maya droughts: Water, life and death. Von Richardson B. Gill. University of New Mexico Press, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Klimaarchiv im Wacholder

Um seine Grenzen zu sichern, expandierte das chinesische Kaiserreich nach Nordtibet. Doch immer wieder erzwangen strenge Dürren den Rückzug, wie hölzerne Grabeinbauten verraten.

Von Mayke Wagner, Pavel Tarasov und Karl-Uwe Heußner

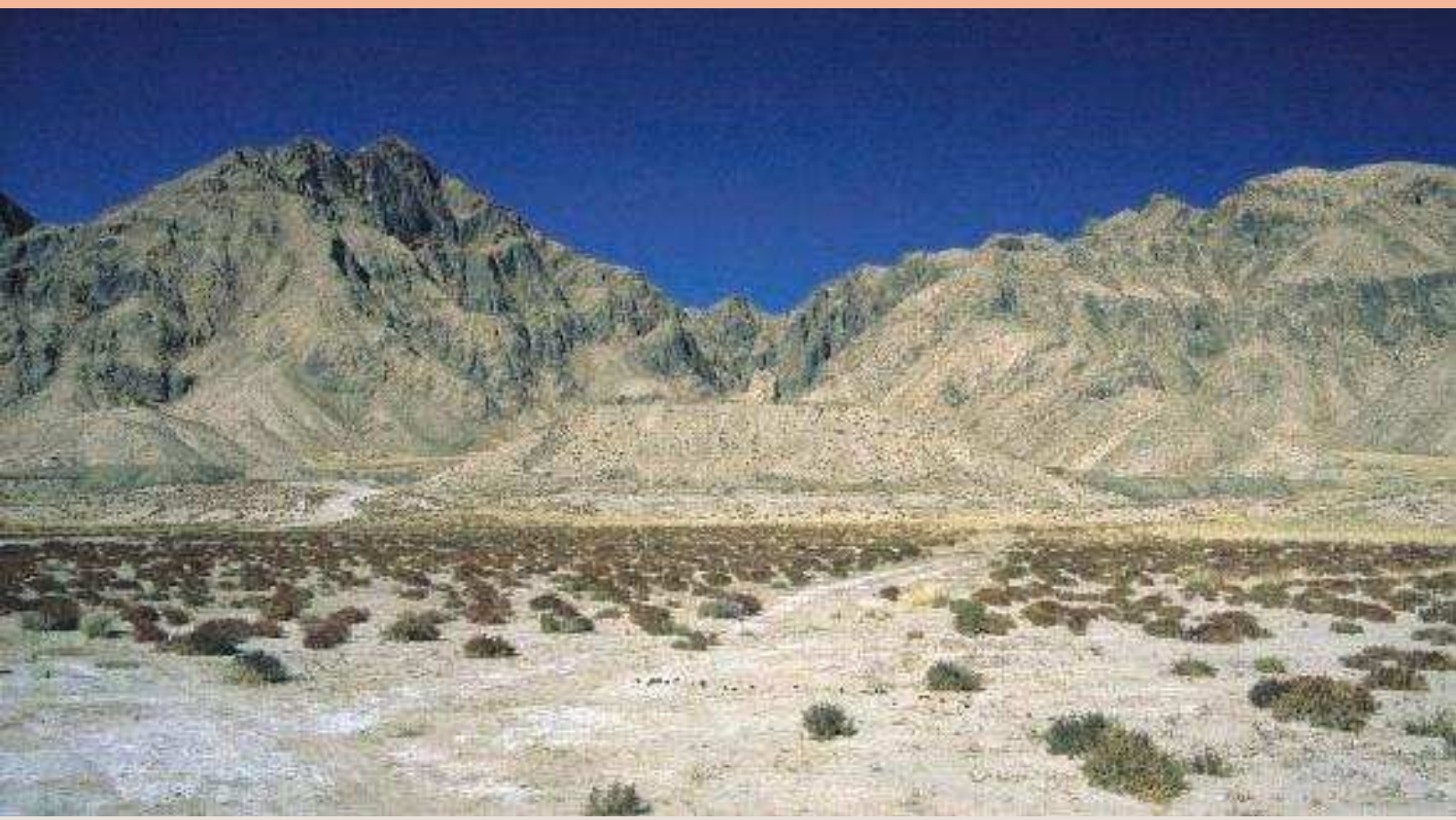
Mit seinen ausgedehnten Schotterwüsten, steilen Geröllhängen, Hochlandsteppen und Dauerfrostböden scheint Nordtibet auf den ersten Blick nur Hirten und Jägern geeigneten Lebensraum zu bieten. Der Eindruck täuscht. Salzhandel und die Kontrolle von Verkehrswegen spielten in der wechselvollen Besiedlungsgeschichte des Hochlands, das heute die chinesische Provinz Qinghai bildet, immer eine besondere Rolle. Auch Feldbau war in klimatisch günstigen Perioden möglich. Archäologische Funde aus Grabkammern des frühen tibetischen Königreichs verraten aber, warum jede darauf aufbauende Politik scheitern musste.

China versuchte schon in den Anfängen des Kaiserreichs, während der »Westlichen Han-Dynastie« (202 v. Chr. bis 23 n. Chr.), in Nordtibet Fuß zu fassen, um den Zugang zu den Einflussgebieten und Kolonien in Zentralasien zu sichern. Garnisonen entstanden ab 60 v. Chr., die sich durch Getreideanbau selbst versorgen sollten (siehe Bild S. 54), Bauern wurden angesiedelt. Nicht zuletzt hoffte der kaiserliche Hof, auf diese Weise das in Nordtibet beheimatete Nomadenvolk der Qiang kontrollieren zu können und an einer Allianz mit den feindlichen Xiongnu in der mongolischen Steppe zu hindern. Als »Qiang« bezeichneten die Chinesen »Schafhirten« und ganz allgemein alle schriftlosen nichtchinesischen Hirtenvölker im Westen.

Mit dieser ersten Migrationswelle gelang es den Chinesen jedoch nicht, sich dauerhaft zu installieren. Der Rückzug nach Osten begann mit einem Aufstand der Qiang 42 v. Chr. Die Kolonisten hatten dem nicht viel entgegenzusetzen, da das Land zu dieser Zeit unter einer Hungersnot litt. Während ihrer letzten Jahrzehnte konnte die Westliche Han-Dynastie nur noch sporadische Vorstöße unternehmen, auch wenn sie für kurze Zeit sogar die Region um den Salzsee Kokonor (chinesisch Qinghai) mit seinen fruchtbaren Weiden wieder unter ihren Einfluss brachte (siehe Karte S. 52). Mit der Verlegung der chinesischen Hauptstadt von Chang'an (dem heutigen Xi'an) in das weiter östlich gelegene Luoyang 25 n. Chr. (daher von nun an »Östliche Han-Dynastie«) verlor das Kaiserreich den Westen an die Hirtenstämme der Qiang und Xiongnu. Zwischen zwei historischen Volkszählungen in den Jahren 2 und 140 n. Chr. flüchteten etwa 6,5 Millionen Bauern aus dem Nordwesten nach Süden und Osten; das entsprach 70 Prozent der Bevölkerung. Bereits 30 n. Chr. wurden im gesamten Norden die Verwaltungen von 400 Kreisen aufgelöst und damit die Gesamtzahl aller steueramtlich registrierten Kreise um ein Viertel reduziert.

Vom Feind zum Freund

Nach dem Untergang der Han-Dynastie 220 n. Chr. gehörte Nordchina den verschiedenen nomadischen Völkern und wurde jahrhundertelang von Territorialkämpfen heimgesucht. Erst ab 581 konnte sich im chinesischen Kerngebiet erneut eine starke Zentralmacht etablieren, die Sui-Dynastie. Als die Tang-Kaiser sie im 7. Jahrhundert ablösten, bildete sich etwa gleichzeitig auf dem tibetischen Hochplateau ein Königreich. Von der Hauptstadt Lhasa aus drangen dessen Streitkräfte auch nach Norden vor und besetzten zwischen 660 und 680 das Gebiet um den See Kokonor. Sie folgten den Handelswegen nach Westen, eroberten alle Oasen im Tarim-Becken und überschritten den Pamir. Ab 704 kontrollierten die Tibeter gemeinsam mit den Westtürken dort den Zugang in das Reich von Sogdi-



MAYKE WAGNER, DAI

▲ **Ganze 47 Meter ragte die einst dreistufige Grabpyramide (Bildmitte) in der Schotterwüste auf, als chinesische Archäologen sie Ende der 1980er Jahre entdeckten. Die obere Partie haben die Forscher bereits abgetragen, sie fanden dabei eine Vielzahl von Tierknochen, offenbar Reste von Opfern für den Toten. Kleinere Grabanlagen in der Umgebung hatten unterirdische Kammern, die für diese karge Region geradezu verschwenderisch mit Holz ausgestattet waren.**

en. Das Kaiserreich akzeptierte die Monarchie auf dem Hochplateau und handelte nach der Devise: Wen du nicht besiegen kannst, den mache dir zum Freund. Beide Reiche unterstützten einander und standen in regem Handelskontakt.

Weder tibetische noch chinesische Archive dieser Zeit enthalten Aufzeichnungen über Art und Umfang der Güter, die während des 5. bis 9. Jahrhunderts Nordtibet erreichten. Daher birgt jede archäologische Entdeckung eine Überraschung. Seit den frühen 1980er Jahren erkunden und dokumentieren Mitarbeiter des Archäologischen Instituts der Provinz Qinghai unter der Leitung von Xu Xinguo Bodendenkmäler am Ostrand des Qaidam-Beckens (»Qaidam« ist Tibetisch für »Salzsumpf«).

Tibets Pyramiden

Die chinesischen Kollegen stießen bei ihren ersten Forschungsreisen in dieser Region auf ein Tal voller Grabpyramiden, deren Bauweise in wesentlichen Zügen den Gräbern der Könige Zentraltibets entspricht. Obwohl dieses erstaunliche Gebiet nur etwa zwanzig Kilometer von der Kreisstadt Dulan entfernt liegt, war es allenfalls Nomaden bekannt, denn es ist schwer zugänglich und war damals nur mit Traktoren zu erreichen. Diese Entdeckung erwies sich als so bedeutsam, dass das Institut eine ständige Arbeitsstation in Dulan einrichtete. Dort, auf 3000 Meter über dem Meer, sind die Arbeitsbedingungen für die Archäologen nicht gerade leicht, da Sauerstoffmangel alle Bewegungen bremst. Die mittleren Temperaturen im Juli steigen nicht über 15 Grad Celsius und fallen im Januar auf minus 10 Grad. Das ist zunächst nicht lebensbedrohlich, doch die Trockensteppe liefert wenig Brennbares. Auch heute noch ist getrockneter Yakdung ein zwar geruchsintensives, doch effizientes Feuerungsmaterial.

Die größte Grabanlage bestand ursprünglich aus drei aufeinander gesetzten und nach oben kleiner werdenden Pyramiden. Von der oberen war bei ihrer Entdeckung nur noch der Maueransatz vorhanden. Dennoch ragte das Monument noch 47 Meter hoch auf, seine Basis war 160 Meter lang und 60 Meter breit (siehe Bild oben). In der zweiten Stufe fanden die Archäologen einen mit Tieropfern gefüllten Raum, in der Basis selbst eine kreuzförmige Grabkammer. Obwohl Räuber schon vor langer Zeit alle Beigaben gestohlen hatten, stießen die Forscher noch auf Reste von Getreide, Textilien und Geschirr. Holzstreifen mit tibetischer Aufschrift verrieten: Die Bestattung fand wahrscheinlich Ende des 8. Jahrhunderts statt. Wer immer in dieser Wüste beigesetzt wurde, gehörte einst zu den Mächtigen des tibetischen Königreichs. Etwa zweihundert Tiere waren in Gruben vor der Pyramide geopfert worden. Dazu gehörten 87 Pferde, die man mit Felsbrocken bedeckt und lebend begraben hatte. Im Verlauf weiterer Entdeckungen und Ausgrabungen am Ostrand des Qaidam-Beckens kamen immer mehr Gold- und Silbergefäße, Brokatstoffe, Schmuckstücke und mehrsprachige Inschriften zu Tage. Sie belegen den direk- ▷

EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; NACH: DAI

▷ ten Import aus China, Sogdien und dem sasanidischen Iran. Auch wenn die gefundenen römischen Münzen in Nordtibet eher als Amulette denn als Währung dienten, sind sie dennoch ein Zeichen dafür, dass die tibetischen Zweige der Seidenstraße zwischen dem 5. und 9. Jahrhundert eine bislang wenig beachtete Blütezeit erlebten.

Frischer Duft aus altem Holz

In allen Grabanlagen fanden die Archäologen reichlich Holz. Einige der unterirdischen Kammern waren in Blockhausweise aus massiven Balken errichtet worden, manche Räume bedeckte eine Lage unbearbeiteter Baumstämme. Das brachte Xu Xinguo auf den Gedanken, ein dendrochronologisches Labor einzuschalten. Denn Ende der 1990er Jahre entstand die erste chinesische Einrichtung dieser Art für Archäologen an der naturwissenschaftlichen Abteilung des Archäologischen Instituts der Akademie der Sozialwissenschaften in Peking; das Deutsche Archäologische Institut hat dieses Projekt begleitet. Und so kam es, dass sich die Forstwirtin Wang Shuzhi und die Autoren dieses Beitrags gemeinsam auf den Weg nach Dulan machten.

Der Kontrast zwischen der heute nahezu vegetationslosen oberirdischen Schotterwüste im Tal der Grabpyramiden und der schieren Masse an toten Bäumen unter der Erde (siehe Bild ganz rechts) konnte kaum größer sein. Woher stammten diese Hölzer? Frau Wang identifizierte Wacholderstämme *(Sabina przewalskii)*, eine in nordwestchinesischen Gebirgen weit verbreitete Art. Durch die allgegenwärtige Trockenheit waren sie so gut erhalten, dass sich beim Absägen von Proben der unverwechselbare Wacholderduft ausbreitete. In Europa wird dieses Gewächs zwar ebenfalls auf Friedhöfen verwendet, allerdings als Strauchsolitär oder Hecke. Die frühen Tibeter dagegen verbauten in ihren Grabräumen Stämme mit Durchmessern bis zu 45 Zentimetern.

Da Wacholder zu den Baumarten gehört, die langsam wachsen, aber lange leben und dabei jedes Jahr genau einen Ring ansetzen, konnten wir annehmen, dass die Stämme in hohem Lebensalter gefällt worden waren. Tatsächlich zählten wir im Labor an keiner Probe weniger als 200 Jahrringe, einmal sogar 1002. Auf diese Weise bilden sich Muster, vergleichbar einem Strichkode, die in allen Stämmen einer Baumart auftauchen, sofern sie gleichen Umwelteinflüssen ausgesetzt waren.

Abhängig von den klimatischen Bedingungen im Wachstumsjahr fallen diese Striche unterschiedlich breit aus. Bei extremer Trockenheit oder Kälte sind sie so schmal, dass sie selbst unter dem Mikroskop unsichtbar bleiben. Indem wir mehr als achtzig solcher Wacholder-Strichkodes überlappend aneinander legten, erhielten wir ein »Musterbuch« (die so genannte Baummittelkurve) für 1315 Jahre. Allerdings: Ohne Verankerung in einem Kalender war dies nur eine relative Chronologie.

Glücklicherweise hatten Dendrochronologen 1993 in der Umgebung von Dulan Baumringkurven an lebenden Wacholderbäumen aufgenommen: Das chinesisch-amerikanische Team um Kang Xingcheng vom Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute in Lanzhou und Paul Sheppard von der Universität von Arizona in Tucson untersuchte Veränderungen der Umweltbedingungen auf hoch gelegenen Bergkämmen. Ihre Chronologie reichte von 1993 zurück bis 159 n. Chr. Wir verglichen beide Zeitreihen und entdeckten: Das Muster für die letzten 642 Jahre der archäologischen Reihe entsprach dem der ersten 642 Jahre der »lebenden« Chronologie. Damit war nicht nur klar, dass die in den Gräbern verbauten Stämme tatsächlich aus der näheren Umgebung stammten. Wir verfügten auch über eine absolute Baumringchronologie für einen Zeitraum von 2508 Jahren.

Und so wie Kang und Sheppard konnten auch wir uns daran machen, in diesem Archiv nach klimatischen Bedingungen der Vergangenheit zu for-

Im Gebirge wenige Kilometer entfernt von Dulan wächst Wacholder, dessen massive Stämme in Gräbern der frühen tibetischen Oberschicht verbaut wurden (ganz rechts). Die polierte Scheibe enthält bei zwanzig Zentimetern Durchmesser bereits etwa 500 Jahresringe.

Das Qaidam-Becken lag in strategisch günstiger Position zwischen dem Kaiserreich China, Zentraltibet, Mongolei und Sogdien. Immer wieder versuchten die Chinesen dort Fuß zu fassen.

schen, allerdings unter archäologischem Blickwinkel. Dafür mussten wir zunächst wachstumsfördernde beziehungsweise -hemmende Klimafaktoren ermitteln. Der einfachste Weg war, die Ringbreiten mit Messdaten der nächstgelegenen Klimastation zu vergleichen – seit 1940 werden in Dulan Niederschlagsmengen systematisch aufgezeichnet. Unsere statistischen Berechnungen zeigten: Während der vergangenen fünfzig Jahre bestimmte der Niederschlag im so genannten hydrologischen oder Wasserjahr die Ringbreiten. Dieses Wasserjahr dauert im Gebiet Dulan vom Juli eines Jahres bis zum Juni des folgenden Jahres. Auf dieser Grundlage entwickelten wir eine Formel, um Niederschlagsmengen aus den Baumringbreiten zu berechnen, und rekonstruierten die Regenmenge für jedes Jahr bis 515 v. Chr. (siehe Grafik S. 54). Weil die Zeit vor 100 v. Chr. aber noch durch zu wenig Holzproben belegt ist, verwenden wir den ältesten Abschnitt der Chronologie derzeit nicht für weitere Analysen. Auch für das Intervall zwischen 700 und 900 n. Chr. wären mehr Proben für eine sichere Aussage notwendig.

Unser Resultat: Die rekonstruierten historischen Werte variieren zwischen 100 und 300 Millimeter Niederschlag und unterscheiden sich im Mittel nicht von neuzeitlichen Daten (pro Jahr seit 1940 durchschnittlich 190 Millimeter Niederschlag). Was uns jedoch sofort auffiel, war, dass das Land in der fernen Vergangenheit häufiger mehrere überdurchschnittlich trockene Jahre in Folge plagten.

Die längste derartige Dürreperiode dauerte offenbar von 51 bis 375 n. Chr., also mehr als dreihundert Jahre. Sie fiel mit der erwähnten Entvölkerung des Nordwestens während der Östlichen Han-Dynastie zusammen. Auch die anschließende von Territorialkämpfen zwischen nomadischen Völkern im Norden geprägte Epoche musste offenbar mit dicht aufeinander folgenden und lang anhaltenden Dürrephasen zurechtkommen. Akuter und dauerhafter Mangel an Niederschlägen machte das Land somit untauglich für den Feldanbau und ließ gerade noch die Weidewirtschaft der Hirtenvölker zu.

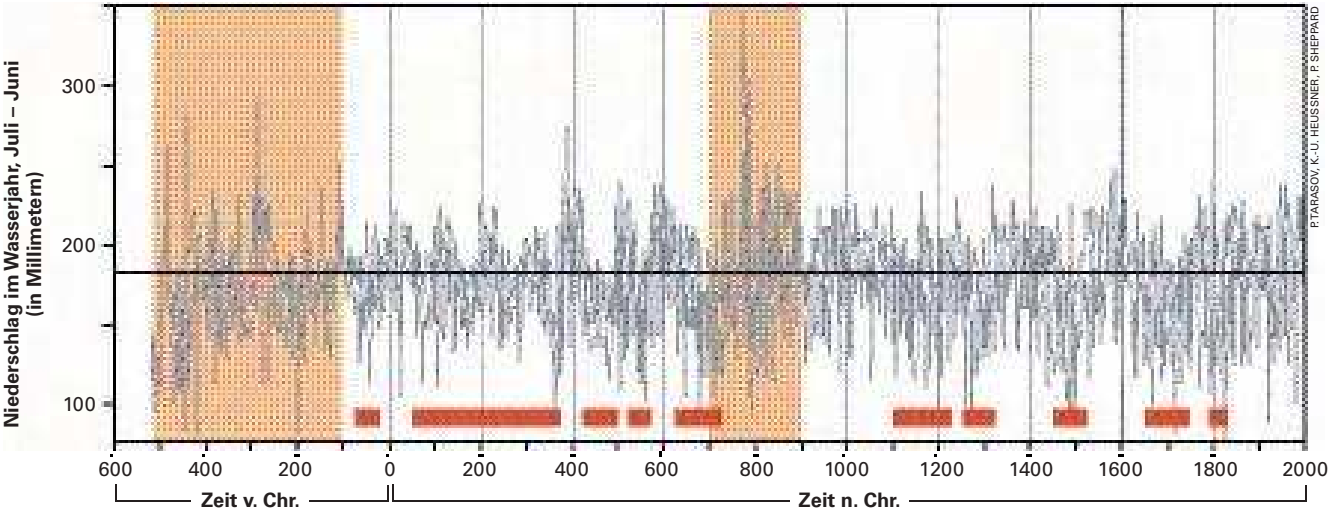
Diese Dürrezeiten während der ersten Hälfte des 1. Jahrtausends waren aber keineswegs ein lokales, auf Nordtibet beschränktes Phänomen. Damals trockneten Seen im Nordwesten der inneren Mongolei aus oder schrumpften erheblich. Landkarten des 3. Jahrhunderts zeigen des Weiteren den Balchasch-See im heutigen Kasachstan mit einer Konturlinie, die dem tiefsten Teil der gegenwärtigen Fläche entspricht. Auf Karten aus dem 9. Jahrhundert hingegen ist der Wasserspiegel wieder deutlich angestiegen. Radiometrische Datierungen von Torfschichten aus Seesedimenten des Aral-Sees bestätigen, dass dessen Oberfläche zwischen etwa 280 und 580 n. Chr. weit unter dem heutigen Niveau lag. Der spätantike Historiker Ammianus Marcellinus (etwa 330–395) bezeichnete ihn als Sumpf. Für das auf Bewässerungsfeldbau angewiesene Reich Choresmien südlich des Aral-Sees war diese Dürrezeit katastrophal.

Frost im Orangenhain, Eis auf dem Gelben Fluss

Auch für die Han-Dynastie bedeutete dies den wirtschaftlichen Ruin – zumal die Flucht der chinesischen Bauern nach Osten und Süden keine Erleichterung brachte. Zwar gingen dort Monsunregen verlässlich nieder, doch statt Dürre herrschten lange und besonders strenge Winter, die vor allem das Wachstum subtropischer Fruchtgehölze beeinträchtigten. Berichtenswert war Chronisten das Scheitern aller Orangenanpflanzungen in den kaiserlichen Gärten von Luoyang von 155 bis 220 n. Chr., obwohl sie zuvor in Chang'an erfolgreich kultiviert worden waren. Kleinere Flüsse zwischen ▷

XIAO YONGMING

K. HAMANN, DAI



Sofern die Zahl der Proben eine gute Statistik zuließ, wurde daraus der Niederschlag des so genannten Wasserjahres ermittelt, also der Zeit vom Juli eines Jahres bis zum Juni des folgenden. Rote Balken kennzeichnen Perioden mit Niederschlägen unter dem Durchschnitt von 188 Millimetern pro Jahr. Farbig hinterlegt sind solche Zeiträume, für die noch keine für statistisch signifikante Aussagen ausreichende Zahl von Holzproben zur Verfügung steht.

▷ den mächtigen Strömen Huang He (Gelber Fluss) und Chang Jiang (Jangtse) froren 225 n. Chr. erstmals seit Menschengedenken zu. In den Jahren 280 bis 289 hielt der Frost bis Mai an, zwischen 420 und 589 erfror häufig die Maulbeerblüte und die Aprikosenblüte öffnete sich besonders spät.

Wie diese Phänomene zusammenhingen, darüber können wir vorläufig nur spekulieren: Ein ungewöhnlich starker Wintermonsun verfrachtete kalte Luftmassen aus Sibirien weiter nach Süden, im Gegenzug dazu war der Sommermonsun zu schwach und brachte die über dem Pazifischen Ozean mit Feuchtigkeit aufgeladene Luft nicht bis nach Nordtibet. Leider wissen Klimaforscher noch nicht, welche Faktoren die Monsunintensität beeinflussen. Das dendrochronologische Archiv aus Dulan kann dieser Forschung neue Daten liefern. Das Klimageschehen am Nordrand des Tibetplateaus und seine Auswirkungen auf die Ökonomie der dort ansässigen Völker hat eine Bedeutung, die weit über Zentral- und Ostasien hinausgeht. Denn darauf läuft archäologisch-paläoklimatische Forschung hinaus: durch das Erkennen von Kausalzusammenhängen in der Vergangenheit Überlebensstrategien für künftige Trockenperioden aufzuzeigen. ◁

Das Tonmodell eines Kornspeichers aus einem hanzeitlichen Grab bei Xining war mit Gerste gefüllt.

Mayke Wagner (Mitte) ist Stellvertretende Leiterin der Eurasien-Abteilung des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI) Berlin und Li-Ching-Professorin der Shandong-Universität (Jinan). Sie lehrt Chinesische Archäologie an der Universität Würzburg. Der Paläoklimaforscher **Pavel Tarasov** (links) lehrt an der Freien Universität Berlin. **Karl-Uwe Heußner** (rechts) leitet das dendrochronologische Labor am DAI Berlin.

Annual precipitation since 515 BC reconstructed from living and fossil juniper growth of northeastern Qinghai Province, China. Von P. R. Sheppard et al. in: Climate Dynamics, Bd. 23, Heft 7-8, S. 869, 2004

Precipitation changes in Dulan 515 BC 800 AD inferred from tree-ring data related to the human occupation of NW China. Von P. Tarasov et al. in: Eurasia Antiqua, Bd. 9, S. 303, 2003

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

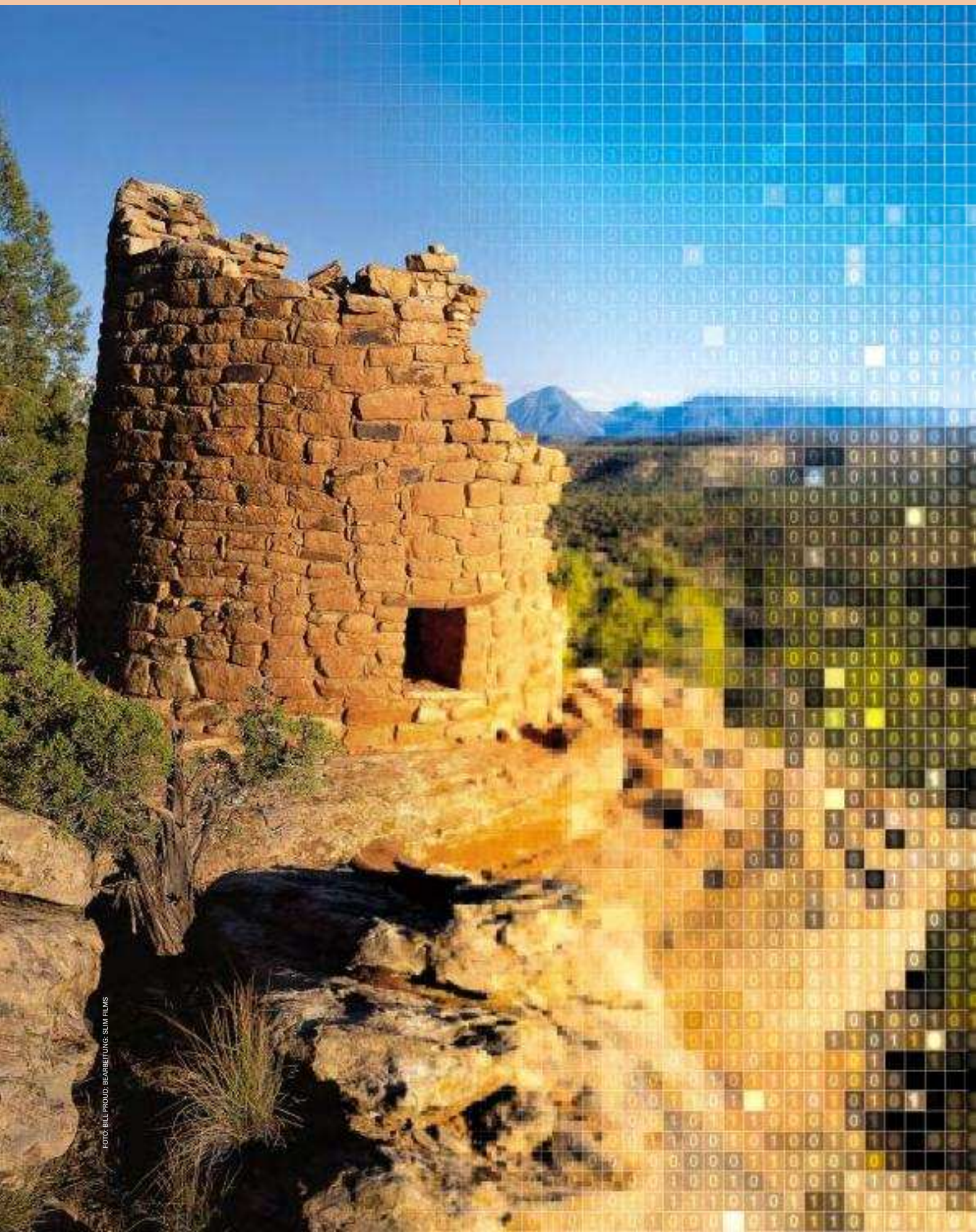


FOTO: BILL PROUD; BEARBEITUNG: SLIM FILMS

Exodus im Computer

Computersimulationen helfen Archäologen, das rätselhafte Verschwinden vorgeschichtlicher Indianervölker zu verstehen.

Von Timothy A. Kohler, George J. Gumerman und Robert G. Reynolds

Nur ein Bruchteil der menschlichen Geschichte ist schriftlich überliefert, für den großen Rest stellt vor allem die Archäologie eine wichtige Informationsquelle dar. Durch Ausgrabung und Auswertung von Ruinen, Artefakten und organischen Überresten konstruiert diese Disziplin Vorstellungen von Gesellschaften, die vor Hunderten, manche vor Tausenden von Jahren existiert haben. Noch komplexer ist es, auch jene Prozesse zu verstehen, die Kulturen hervorbringen und verändern. Denn anders als etwa in den Naturwissenschaften lassen sich Hypothesen über Ursache-Wirkungs-Ketten in den Geschichtswissenschaften nicht experimentell untersuchen.

Doch keine Regel ohne Ausnahme: Mit Hilfe von Computersimulationen versuchen Archäologen Schlüsselprozesse wie etwa Bevölkerungswachstum oder Ressourcenverbrauch nachzustellen und die Rechenergebnisse mit ihren Befunden abzugleichen. Ein frühes Beispiel aus den 1970er Jahren untersuchte den Kollaps der klassischen Mayazivilisation, die einen Großteil des heutigen Mexiko und Zentralamerika zwischen 300 und 900 n. Chr. beherrschte. Einer gängigen Theorie zufolge war das Fehlverhalten der Mayaeliten in einer Krise ein wichtiger Auslöser: Um den Verlust ihrer Stellung besorgt, als Nahrung und Wasser knapp wurden, ließen die Mächtigen Paläste und Tempel errichten. Das band aber Arbeitskräfte und verschlechterte die Gesamtlage weiter. Ließe sich ein solches, nur verbal formuliertes Modell in Software umsetzen? Würde diese die Dynamik der Entwicklung widerspiegeln? Unter der Leitung des Massachusetts Institute of Technology in Cambridge entstanden Algorithmen, die Variablen wie die Bevölkerungszahl mit der Baurate von Monumenten korrelierten.

Painted Hand, die »gemalte Hand«, ist eine 800 Jahre alte Ruine der Pueblo-Indianer im Mesa-Verde-Gebiet, das sich im südwestlichen Colorado erstreckt. Diese Region modellierten die Autoren mit Hilfe von objektorientierter Programmierung, um die Muster der Besiedlung und Landnutzung in der Vorgeschichte zu studieren.

Virtuelle Indianer

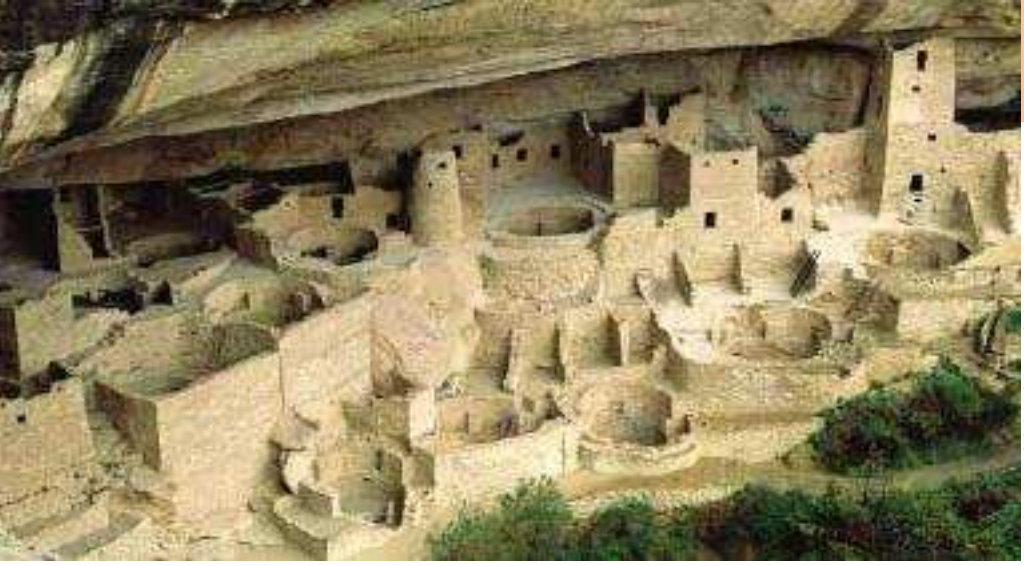
Das Ergebnis war viel versprechend. Allerdings berücksichtigte diese Studie keine regionalen Unterschiede etwa hinsichtlich des landwirtschaftlichen Ertrags. Doch erfüllte sie ihren Zweck: zu zeigen, dass aus archäologischen Hypothesen tatsächlich Computermodelle abgeleitet und geprüft werden können.

Seit wenigen Jahren bietet die objektorientierte Programmierung dazu noch viel bessere Möglichkeiten: Sie lässt »Agenten« miteinander »wechselwirken«. Das können zum Beispiel einzelne Haushalte sein, die Allianzen bilden, Güter austauschen und natürlich Ressourcen verbrauchen. Regeln geben gezielt Handlungsmöglichkeiten vor. Innerhalb dieses Rahmens lernen die virtuellen Einheiten aus ihrer Erfahrung und entwickeln sogar neue Verhaltensweisen, um in ihrer Welt besser zu bestehen.

Dieses Verfahren setzen wir ein, um ein Phänomen der frühen Geschichte der Vereinigten Staaten zu untersuchen. In dem als »Four Corner« bezeichneten Gebiet, das sich in den Bundesstaaten Arizona, New Mexico, Colorado und Utah befindet, lebte einst das Indianervolk der Anasazi. Noch heute beeindrucken ihre Pueblos – ineinander verschachtelte Häuser, die nur über Leitern vom Dach aus zugänglich waren. Diese Kultur erreichte ihren Höhepunkt zwischen 1000 und 1300, doch dann verließen die Anasazi innerhalb kurzer Zeit die Region in Richtung Süden, in das heutige Zentralarizona, das westliche New Mexico und in den nördlichen Abschnitt des Rio-Grande-Tals. Nach wie vor ist dieser Exodus eines der großen Rätsel, das die amerikanischen Archäologen beschäftigt.

Anhand von Jahresringen der in Pueblos verbauten Bäume lässt sich der Anfang jeder Siedlung genau datieren, denn es gibt für den Südwesten der USA ein umfassendes dendrochronologisches Archiv (siehe auch den Beitrag S. 50). Zudem taugt dieses »Musterbuch« der Jahresringe dazu, Temperatur und Niederschlag der Vergangenheit zu erschließen, denn klimatische Faktoren beeinflussen die Ringbreite. Paläoklimatologen nutzen außerdem Pollenanalysen und geologische Daten. Solche Informationen helfen dann wieder, Computermodellen die richtigen Rahmenbedingungen zu geben. Um Siedlungs- und Landnutzungsmuster zu rekonstruieren, arbeiten wir derzeit mit zwei agentenbasierten Modellen.

Das erste simuliert die Verhältnisse im Long-House-Tal, einem 180 Quadratkilometer großen Gebiet im Nordosten Arizonas, das zwischen 1800 v. Chr. und ▷



TERRA GALLERIA PHOTO, QUANG-TUAN LUONG

Hoch in den Klippen der Mesa Verde bauten die Indianer Mitte des 13. Jahrhunderts ihre Dörfer. Während einer ausgeprägten Dürre waren die Nahrungsvorräte dort leichter zu verteidigen.

▷ 1300 von Indianern besiedelt war. In den vergangenen 25 Jahren rekonstruierte ein interdisziplinäres Team unter der Leitung von Jeffrey Dean vom Labor für Jahresringforschung der Universität Arizona mit großer Genauigkeit die vorgeschichtlichen Umweltbedingungen. Die Analyse basiert auf Niederschlagsmengen, Schwankungen des Grundwasserspiegels sowie Zyklen der Erosion und Sedimentablagerung. Daraus schätzten die Forscher für jeden Hektar ab, wie gut er sich für den damaligen Maisanbau eignete, und das für jedes Jahr zwischen 400 und 1450.

Für unsere Simulation veränderten wir eine Software, die bei Brookings Institution (Santa Fe) und am Santa-Fe-Institut entwickelt wurde. Wir gaben die Umweltdaten in eine digitalisierte Karte des Long-House-Tals ein, dann platzierten wir unsere virtuellen Haushalte mit einem Zufallsgenerator auf dem Gelände. Deren Bedarf an Nahrungsmitteln modellierte Alan Swedlund von der Universität Massachusetts in Amherst anhand archäologischer Daten sowie auf Grund ethnografischer Studien an zeitgenössischen Puebloindianern und anderen Formen von Subsistenzwirtschaft (bäuerlichen Gemeinschaften, die im Wesentlichen den eigenen Lebensunterhalt erwirtschaften). In unserem Ausgangsmodell umfasste nun jeder Haushalt fünf Individuen, jedes davon verzehrte 160 Kilogramm Mais pro Jahr. Außerdem nahmen wir an, dass auf Grund von Mäusen, Insekten und anderen Verlustfaktoren nur 64 Prozent des Anbaupotenzials einer Fläche tatsächlich zum Tragen kamen. Jede Familie durfte bis zu 1600 Kilogramm Korn bevorraten.

Es gab einfache Regeln: Fielen Ernteertrag samt Vorräten unter das zum Überleben notwendige Niveau, zog der jeweilige Agent weiter. Erreichte eine Tochter das Alter von 15, wurde ein neuer Haushalt gegründet (sie heiratete und verließ ihre Eltern). Außerdem durfte keine Niederlassung weiter als einen Kilometer vom Ackerland entfernt sein und musste so nahe wie möglich bei einer Wasserversorgung liegen. Diverse Variablen ermöglichten uns die Anpassung der Fruchtbarkeit und Lebenserwartung unserer virtuellen Anasazi.

Feintuning der Variablen

Die Simulationen zeigten deutlich, wie stark Umweltbedingungen den Ort und die Größe einer Siedlung beeinflussten, ebenso das Auf und Ab der Bevölkerungsdichte. Tatsächlich ließen sich unsere Agenten bevorzugt an Plätzen nieder, an denen Archäologen im realen Tal Belege für Siedlungen gefunden haben. Doch es gab auch einen gravierenden Unterschied: Das Programm errechnete zunächst eine sechsmal höhere Bevölkerungszahl, als Funde vermuten lassen. Doch indem wir die Produktivität des Maisanbaus weiter reduzierten – was in jener Zeit sicher realistisch war, denn die Ergiebigkeit des Getreides selbst variierte damals sehr stark – und zudem die einzelnen Haushalte weniger fruchtbar und kurzlebiger machten, näherten wir uns den Schätzungen der Archäologen.

Die Studie spiegelte auch das Drama gegen Ende des 13. Jahrhunderts wider, als der Grundwasserspiegel wegen einer langen Dürrezeit drastisch fiel. Wohnten in unserem Modell um 1250 noch 200 Haushalte, waren es fünfzig Jahre später nur noch acht. Allerdings entspricht auch das nicht dem archäologischen Befund. Obwohl es unserer Simulation zufolge einer kleinen Zahl von Menschen auch unter den schlechten klimatischen Bedingungen noch möglich gewesen wäre, dort zu existieren, sind seinerzeit in der Realität alle Anasazi gestorben oder haben ihre Heimat verlassen. Offenbar berücksichtigt unser Modell noch nicht alle Faktoren. Hatte Nahrungsmangel die Anfälligkeit gegen Krankheiten gesteigert? Oder beschlossen die Stammesangehörigen aus einem unbekannten Grund den Exodus, um anderswo einen Neuanfang zu wagen?

Unser zweites Modell simuliert die Vorgeschichte Südwest-Colorados. Um 600 machten dort Farmer das Land urbar; Archäologen nennen diese Periode Korbmacher III. Die Familien lebten in Grubenhäusern: Sie hoben eine flache Grube aus und setzten darauf eine lehmverputzte Konstruktion aus Ästen und Zweigen. Solche Behausungen gruppierten sich zu kleinen Weilern, die wiederum ein Netzwerk von Nachbarschaftsgemeinden bildeten. Die Jagd spielte für diese Menschen eine ebenso große Rolle für die Ernährung wie die Landwirtschaft. Diese Pioniere waren äußerst erfolgreich. Weitere Zuwanderung ließ die Bevölkerungszahl beträchtlich anwachsen. In dem von uns betrachteten Gebiet entstanden gegen Ende des 8. Jahrhun- ▷

IN KÜRZE

Virtuelle Archäologie

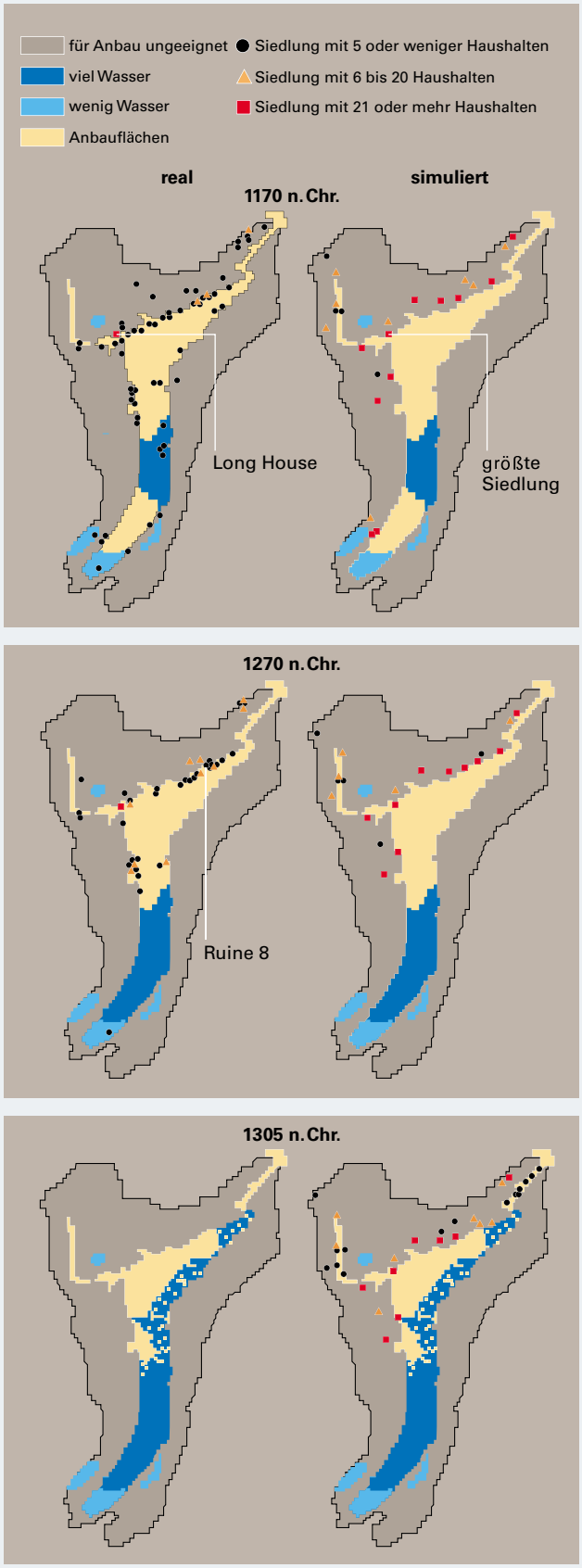
▶ **Mit objektorientierter Programmierung** und so genannten Software-Agenten modellieren Archäologen, wie sich veränderte Umweltbedingungen auf die Puebloindianer im amerikanischen Südwesten ausgewirkt haben könnten.

▶ **Die Simulationen legen die Vermutung nahe**, dass das rätselhafte Verschwinden der Anasazi Ende des 13. Jahrhunderts mit ausgeprägten Dürreperioden einherging, damit aber nicht allein erklärt werden kann.

▶ **Neue Modelle** sollen auch die Effekte der Jagd, des Brennholzsammelns sowie kulturelle Prozesse wie den Tauschhandel berücksichtigen.

Das Tal der langen Häuser

Das Long-House-Tal im nordöstlichen Arizona war zwischen 1800 v. Chr. und 1300 n. Chr. von Puebloindianern bewohnt. Die Autoren versuchten durch Computersimulationen des Maisanbaus und der Siedlungsmuster herauszufinden, warum das Tal vor etwa 700 Jahren verlassen wurde.



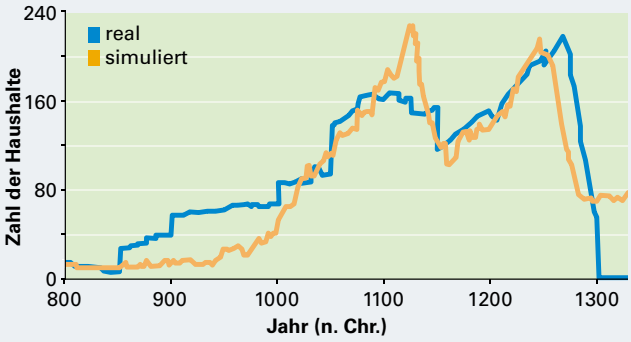
GRAFIK UND KARTEN: LUCY READING-IKKANDA, NACH: JEFFREY S. DEAN (UNIV. OF ARIZONA), GEORGE J. GUMERMAN (SCHOOL OF AMERICAN RESEARCH), JOSHUA M. EPSTEIN & ROBERT L. AXTELL (BROOKINGS INSTITUTION)

MUENCH PHOTOGRAPHY INC.

Ruine 8, ein Zeugnis harter Zeiten

Die Forscher konstruierten ein Modell, das zahlreiche Umweltdaten wie Niederschlag und Grundwasserschwankungen auf eine digitale Karte des Gebiets abbildet und Haushalte zunächst zufällig dort verteilt. Für die Zeit um 1170 ergab die Simulation eindeutige Siedlungsgruppierungen im nordwestlichen Grenzbereich, was mit den archäologischen Fakten gut übereinstimmt. Tatsächlich befindet sich die größte der virtuellen Siedlungen nur etwa 100 Meter von der größten Ruine des Tals entfernt, das namengebende Long House (oben links).

Um 1270 war der Ackerboden im südlichen Tal so weit durch Erosion abgetragen, dass die Bevölkerung neue Plätze suchte wie die als Ruine 8 bezeichnete Klippensiedlung. Das spiegelt die Simulation ebenfalls gut wider (Mitte). Doch für die nachfolgende Zeit einer großen Dürre errechnete der Computer eine kleine Zahl Überlebender, während das Tal in Wirklichkeit um 1305 völlig entvölkert war (unten links). Der Exodus muss offenbar noch weitere Gründe gehabt haben, die in den Modellen bislang noch nicht berücksichtigt sind.



derts Dörfer mit Hunderten von Einwohnern, manche davon wuchsen immer weiter – ein bedeutsamer Wandel der Siedlungsweise.

Um 900 aber wanderten viele Indianer aus. Als Ursachen diskutieren Experten eine Entwaldung nahe der Ortschaften sowie eine Reihe kühler und trockener Sommer. Normalerweise variiert das Klima in der Region von warm und trocken zu kühl und feucht. Die Kombination von kühl und trocken im Sommer schmälerte zweifellos den Ernteertrag, denn diese Indianer kannten keine künstliche Bewässerung.

Im folgenden Jahrhundert verbesserten sich die Bedingungen und die Bevölkerungszahlen stiegen wieder an. Truthahnzucht gewann nun mehr und mehr an Bedeutung. Erneut lebten die Menschen in kleinen Weilern oder losen Nachbarschaften. Gegen Ende des 11. Jahrhunderts schließlich kristallisierten sich sogar regionale Zentren heraus. Manche davon scheinen von den komplexen Pueblosiedlungen des Chaco Canyon im heutigen Nordwesten New Mexicos beeinflusst worden zu sein. Zum Beispiel standen in einigen dieser Großdörfer mehrstöckige Gebäude mit zahlreichen Räumen, was mehr an die Chaco-Architektur erinnert als an lokal vorkommende Baustile.

Doch um 1135 setzte eine strenge Dürre ein, die 45 Jahre lang andauerte. Die Folgen waren verheerend: Archäologen fanden Spuren extremer Gewalt, vielleicht sogar Kannibalismus. Und doch sank die Bevölkerungszahl nur wenig, das Muster aus regionalen Zentren, umgeben von kleinen Weilern, blieb bestehen. Allerdings verlegten die Einwohner Mitte des 13. Jahrhunderts große Siedlungen an leichter zu verteidigende Plätze. Damals entstanden in den Steilwänden des Mesa-Verde-Nationalparks die berühmten Felsendörfer. Doch schließlich verließen die Anasazi wie andernorts auch ihre Heimat und flohen Richtung Süden und Osten.

Kein Exodus in Mesa Verde

Unsere Simulation berücksichtigt ein Gebiet von 1800 Quadratkilometern nordwestlich des Mesa-Verde-Nationalparks. Wir unterteilten die virtuelle Landschaft in 45 000 quadratische Zellen mit jeweils 200 Meter Kantenlänge. Jeder davon ordneten wir eine Maisproduktivität zu, je nach Bodentyp, Höhe über dem Meeresspiegel und jährlicher Niederschlagsmenge (diese Angaben rekonstruierte Carla Van West, jetzt bei Statistical Research in Tucson, in ihrer Doktorarbeit).

Unser Interesse galt zunächst der Zeit von 900 bis 1300. Wie in der Long-House-Tal-Simulation ließen wir die Haushalte von einem Zufallsgenerator auf der Fläche verteilen. Danach durften sich die Softwareagenten ihren eigenen Platz suchen. Die Regel dabei lautete: Siedle auf oder nahe fruchtbarem und noch nicht genutztem Ackerland.

Wieder reproduzierte das Modell zunächst nur grob das archäologisch gesicherte Muster. Als wir den »Familien« vorgaben, auch Wasserressourcen zu berücksichtigen – in semiariden Gebieten eine nahe liegende Annahme –, verbesserte sich das Ergebnis deutlich. Schließlich bauten wir obendrein eine Verschlechterung der Ackerböden von Ernte zu Ernte ein, die immer wieder zur Erschließung neuer Lebensräume zwang. Auch das brachte eine weitere Annäherung an die harten Fakten. Doch am Ende blieb in der Simulation erneut der Exodus aus. Welche Faktoren fehlten uns?

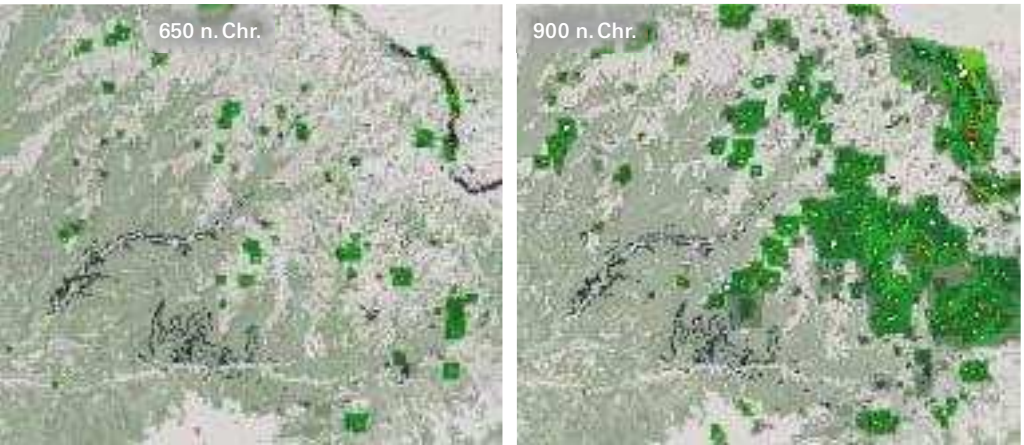
Außen vor blieb zum Beispiel die Kleine Eiszeit, eine zwischen 1300 und 1850 herrschende Kälteperiode, deren Auswirkungen auf den Südwesten kontrovers diskutiert werden. Unser Untersuchungsgebiet ist recht hoch gelegen und befindet sich an der nördlichen Grenze jener Klimazone, in der damals Maisanbau möglich war. Selbst ein leichter Temperaturrückgang während des Getreidewachstums oder eine Verkürzung der fruchtbaren Jahreszeit könnte massive Konsequenzen gehabt haben.

Die Doktoranden David Johnson und Jason Cowan von der Washington State University haben außerdem mit unserem Modell nachgewiesen, dass die Pueblo-indianer die Ressource Brennholz in der Mesa-Verde-Region am Ende der Besiedlungszeit weit gehend ausgeschöpft hatten. Die beiden nahmen an, dass eine Familie pro Person und Jahr 1,1 Tonnen Holz verfeuerte, vergleichbar dem Verbrauch in Dörfern Pakistans vergleichbarer Höhe und geografischer Breite. Nach 700 Jahren Nutzung zeigten die Simulationen eine komplette Entwaldung um die Dörfer (siehe Bild unten). Wir entwickeln derzeit Programme, um zudem die Langzeitauswirkungen auf die Populationen der wichtigsten Beutetiere – Rotwild, Hase und Kaninchen – zu ermitteln. Es zeichnet sich ab, dass insbesondere Rotwild bald weit gehend ausgerottet war, was die Anasazi durch die Truthahnzucht teilweise kompensierten.

Mittlerweile haben wir den Zeithorizont unseres Colorado-Modells bis zu den Pionieren um 600 ausgedehnt. Wir wollen wissen, warum die frühen Dörfer so stark wuchsen und dann so dramatisch wieder zurückgingen. Dabei hilft uns, dass das Crow Canyon Archaeological Center in Cortez (Colorado) vor Kurzem neue Surveys, also systematische Begehungen großer Flächen, durchgeführt hat. Außerdem unternahm dieses Institut in unserem Untersuchungsgebiet eine erneute Datierung von 3300 Siedlungsplätzen. Wir verfügen nun über weitaus präzisere Karten als bisher, um die Simulationsergebnisse zu überprüfen.

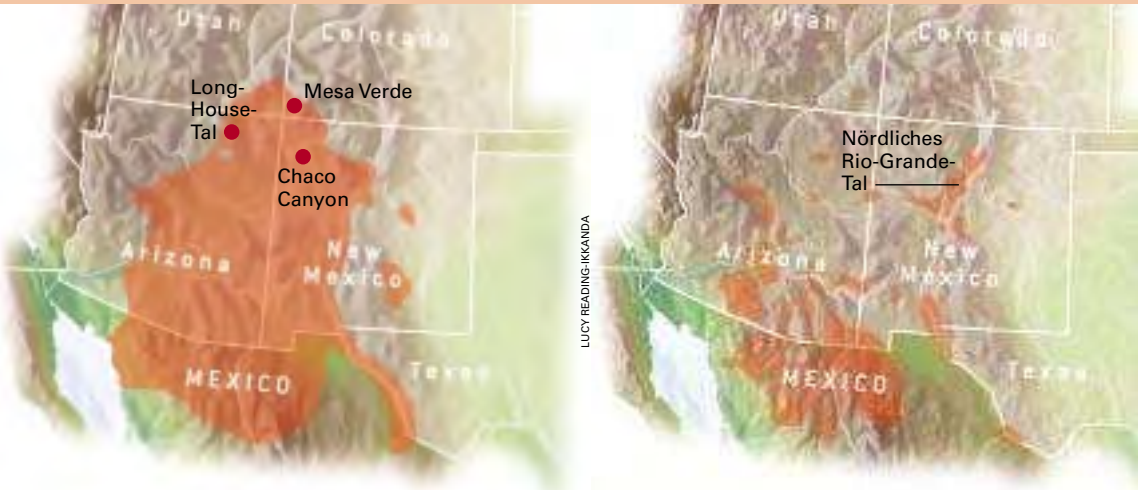
Kenneth Kolm, ein Hydrologe der Washington State University, und Schaun Smith, Doktorand an der Colorado School of Mines, haben außerdem einen Algorithmus entwickelt, der die Auswirkung von Temperatur und Niederschlag

Brennholz war eine wichtige Ressource für die Anasazi. Unter der Annahme, dass ein Mitglied einer Siedlung pro Jahr etwa 1,1 Tonnen davon benötigte, zeigt die Computersimulation, dass um 650 noch ausreichend davon in den Wäldern um die Niederlassungen (rote, gelbe und weiße Flecken) zu finden war, doch eine wachsende Bevölkerung 250 Jahre später kein Totholz mehr in den Wäldern (grün) beließ.



WSU, TIMOTHY KOHLER, C. DAVID JOHNSON, JASON COWAN

Ende des 13. Jahrhunderts erstreckte sich das Gebiet der Maisanbauer (rot) nach Norden bis in das heutige Utah und Colorado und umfasste Hochebenen ebenso wie Flusstäler (links). Doch nach 1400 verließen die Puebloindianer dieses Gebiet und zogen sich in Täler zurück, in denen noch Bewässerung möglich war (rechts).



LUCY READING-IKKANDA

auf Quellen und Wasserläufe im Jahresabstand modelliert. Denn wir wissen aus den archäologischen Befunden, dass sich viele Siedlungen im 13. Jahrhundert um den Oberlauf der Canyonflüsse gruppierten. Waren andernorts also Quellen versiegt? Leider bestätigen unsere Simulationen diese nahe liegende Annahme bislang nicht, wir fanden noch keine signifikanten Effekte.

Schließlich wollten wir sogar soziale und kulturelle Regeln einbauen. Derartige Algorithmen entwickelte Kent Flannery von der Universität Michigan in Ann Arbor, um das Aufkommen der Landwirtschaft in Zentralamerika zu ergründen. Flannery nahm an, dass der Übergang von den Jäger-Sammler-Gemeinschaften zu einer Ackerbaukultur in Mexikos Oaxaka-Tal erst möglich wurde, als die Menschen gelernt hatten, Anbau und Ernte zu planen. Einer von uns (Reynolds) hat Flannerys Modell in ein Computerprogramm umgesetzt. Pflanzenreste in einer Höhle dieses Tals namens Guilá Naquitz lieferten die Grundlage für einen Basisregelsatz, der den Softwareagenten angab, wo und wann wild lebende Pflanzen zu beschaffen waren. Außerdem konnten sie ihre Strategien an die Umgebungsbedingungen anpassen, zum Beispiel in trockenen Jahren das Sammeln intensivieren, in feuchten den Anbau von Pflanzen erproben. Verhaltensweisen, die sich als effektiv erwiesen, wurden einem »Glaubensraum« zugewiesen, einer Instanz, die aus individuellen Erfahrungen allgemein gültige Regeln ableitet.

Tatsächlich spiegelte ihr Nahrungsspektrum zunächst die Befunde aus den Anfängen der Höhlennutzung, in der das Sammeln von Wildpflanzen überwog. Doch in den feuchten und weniger schwierigen Jahren erprobten die virtuellen Indianer den Ackerbau und offenbar »überzeugten« dessen Vorteile: Wie im archäologischen Befund setzten sich die Kulturpflanzen allmählich durch.

Reynolds und Ziad Kobti von der Universität Windsor in Ontario (Kanada) implementierten solche Algorithmen in die Mesa-Verde-Simulation. Die Frage war: Was geschieht, wenn Haushalte in einem Verwandtschaftsnetzwerk Mais tauschen? Dieses Projekt modelliert, was der Anthropologe Marshall Sahlins von der Universität Chicago als verallgemeinerte Reziprozität bezeichnet: Den Austausch von Gütern zwischen engen Verwandten, bei dem Gaben nicht im vollem Umfang wiedererstattet werden müssen. Die Algorithmen halfen den Haushalten zu entscheiden, mit wem sie in eine Tauschbeziehung treten sollten. Frühere Erfahrungen spielten dabei eine Rolle, denn das Ziel war gegenseitiger Vorteil. Waren Verallgemeinerungen über das Prozedere möglich, gingen sie wieder in den Glaubensraum ein, sodass sie auch anderen Familien zugänglich wurden. Das Ergebnis: Die Bevölkerung wuchs. Offenbar lernten die virtuellen Bauern schlechte Ernten durch gegenseitige Hilfe aufzufangen.

Isolation statt Kooperation

In einer anderen Serie von Experimenten schränkten wir die Möglichkeit ein, bei nachlassender Produktivität des Ackerlands weit entfernt neu zu siedeln. Dadurch simulierten wir die gefährliche Isolation in einer feindseligen Umgebung. Innerhalb der durch Verwandtschaft verbundenen Gemeinden nahm zwar der Güteraustausch dramatisch zu, der mit der Außenwelt kam aber zum Erliegen. Das machte die isolierten Weiler nicht nur anfälliger gegen klimatische Veränderungen – durch den beschränkten Siedlungsraum war auch die Versorgung mit Brennholz und Wild gefährdet.

Unsere Modelle vermögen also einige Aspekte der archäologischen Wirklichkeit zu reproduzieren, bislang aber nicht den vollständigen Exodus. Auch regionale Zentren entstanden in der virtuellen Welt nicht in dem Maße – vermutlich weil unser Verhaltensmodell den Faktor »Schutzbedürfnis« nicht nachbildet. Immerhin liefern die Berechnungen deutliche Hinweise darauf, dass die Anasazi des 13. Jahrhunderts an vielen Fronten zu kämpfen hatten. So simpel unsere virtuellen Welten auch im Vergleich zur Realität erscheinen mögen, zeigen sie doch Trends auf und geben Hinweise. Nachhaltige Bewirtschaftung ihrer Ressourcen war offenbar nicht die Stärke der Anasazi. Welche katastrophalen Folgen ein Raubbau letztlich hat, lehrt uns heute die Archäologie im Verein mit den Computerwissenschaften. ◁

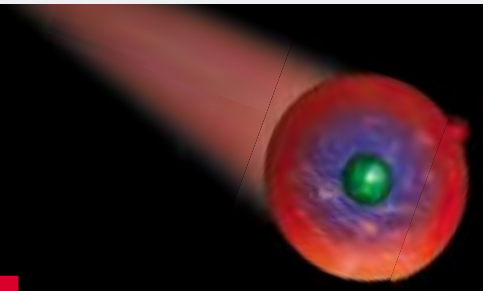
Timothy A. Kohler (links) lehrt Anthropologie an der Washington State University in Pullman und forscht am Crow Canyon Archaeological Center in Cortez (Colorado). **George J. Gumerman** (Mitte) ist Interimspräsident der School of American Research in Santa Fe. Beide sind Experten für die Vorgeschichte des Südwestens der USA. **Robert G. Reynolds** lehrt Informatik an der Wayne State University und forscht am Museum für Anthropologie der Universität Michigan in Ann Arbor.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Der Exodus der Anasazi. Von Stephen H. Lekson in: Moderne Archäologie, Spezial, Spektrum der Wissenschaft, S. 80, 2003

Dynamics in human and primate societies: Agent-based modelling of social and spatial processes. Von T. A. Kohler und G. J. Gumerman (Hg.). Oxford University Press, 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Künstliche kalte Antimaterie

Neuerdings können Physiker aus Antiteilchen einfachste Atome bilden und in speziellen Behältern sammeln. Mit solchem Antiwasserstoff soll eine grundlegende Symmetrie des Universums erforscht werden.

Von Graham P. Collins

Antimaterie ist der Todfeind gewöhnlicher Materie. Wie der aus der Art geschlagene Zwilling eines normalen Elementarteilchens gleicht das Antiteilchen in jeder Hinsicht seinem Widerpart – bis auf die entgegengesetzte elektrische Ladung. Wenn beide sich treffen, vernichten sie einander sofort. Schon bei der Begegnung eines einzigen Gramms Antimaterie mit seinem Gegenstück würde durch Paarvernichtung sämtlicher Partikel eine Energie frei, die der Explosion von 40 000 Tonnen TNT entspricht – genug, um fast 5000 Haushalte ein Jahr lang mit Energie zu versorgen.

Zu unserem Glück – oder zum Nachteil unserer Energieversorgung – kommt Antimaterie in der Natur kaum vor. Einige radioaktive Stoffe emittieren Positronen, die Antiteilchen der Elektronen, und werden für die Positronen-Emissionstomografie (PET) eingesetzt. Auch mit der kosmischen Strahlung gelangt immerfort eine kleine Anzahl von Positronen aus dem All zur Erde. Außerdem finden sich zahlreiche Antipartikel in den gewaltigen Teilchenschauern, die beim Aufprall eines hochenergetischen kosmischen Teilchens auf ein Atom der Erdatmosphäre entstehen.

Aber Antimaterie am Stück sucht man in unserer Welt vergebens. Nicht einmal einzelne Atome aus Antiteilchen scheint es in der Natur zu geben. Dabei verspricht die Untersuchung solcher Antiatome tiefe Einblicke in physikalische Zusammenhänge. Deshalb versuchen Wissenschaftler die exotischen Gebilde selbst zu fabrizieren. In den letzten Jahren haben sie dafür raffinierte Methoden ausgeheckt und erste Erfolge erzielt.

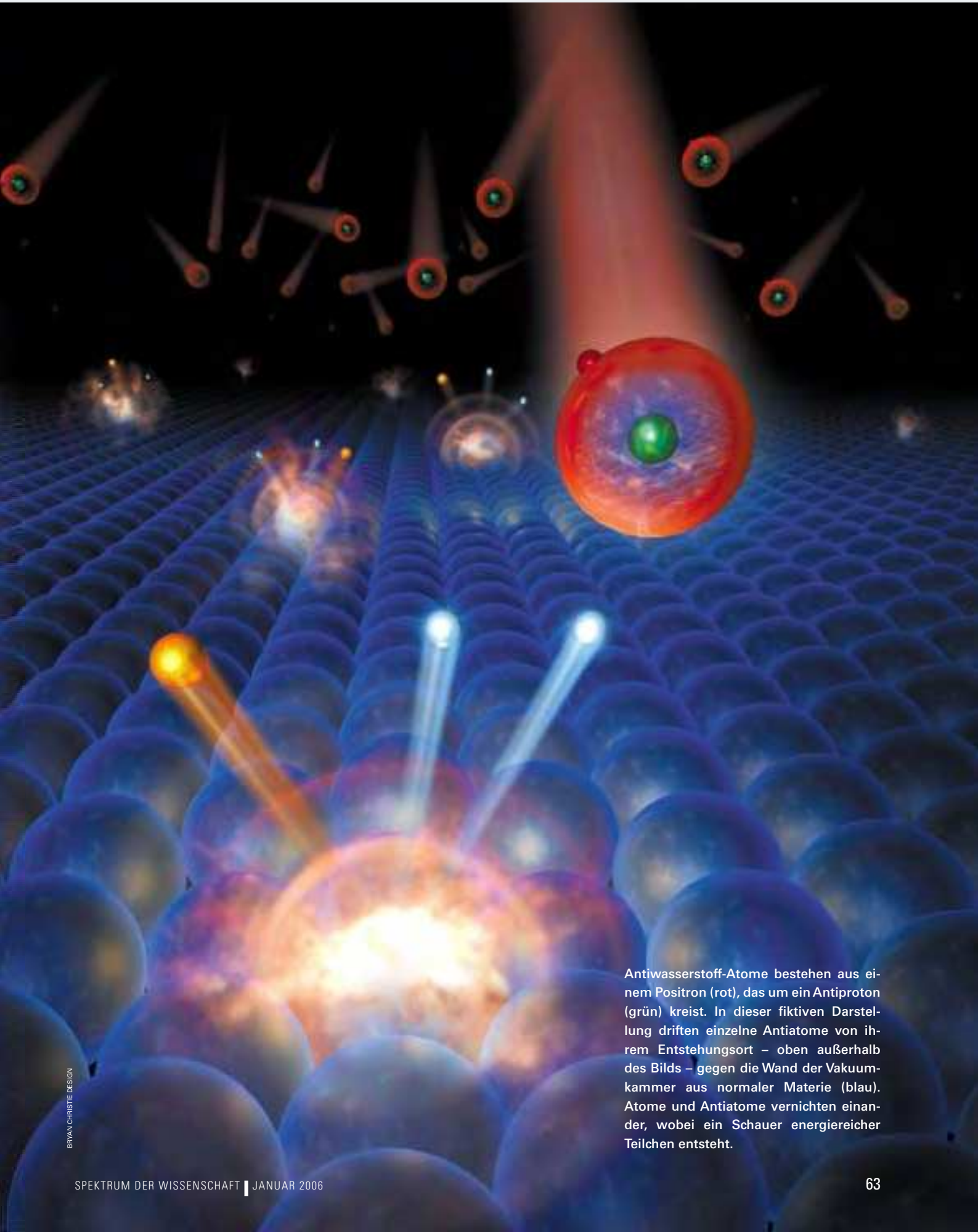
IN KÜRZE

- **Antiteilchen und Teilchen** haben entgegengesetzte Ladung; beim Zusammentreffen vernichten beide einander unter Freisetzung einer großen Energiemenge. Kürzlich konnten Physiker erstmals aus zwei Antiteilchen relativ langsame – »kalte« – Antiatome herstellen.
- Mit solchen **Antiwasserstoff-Atomen** möchten die Forscher eine fundamentale Eigenschaft des Universums testen, die CPT-Symmetrie. Selbst eine winzige Verletzung dieser Symmetrie wäre eine Sensation – ein Indiz für eine neue Physik jenseits des Standardmodells.
- Bislang liegt **die Temperatur des künstlichen Antiwasserstoffs** allerdings bei 2400 Kelvin – weit über den 0,5 Kelvin, die für CPT-Tests erforderlich sind. Das nächste Ziel ist nun, Antiatome zu erzeugen, die sich durch tiefere Temperatur und niedrigen Anregungszustand für spektroskopische Untersuchungen eignen.

Erste Antiatome: viel zu heiß

Die Teilchenphysiker erzeugen schon seit 1955 Strahlen aus Antiprotonen; das gelang erstmals am Bevatron-Beschleuniger des Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien durch Beschuss von Kupfer mit Protonen. Das ist das Gegenteil der Paarvernichtung: Ein Teil der Kollisionsenergie verwandelt sich in Proton-Antiproton-Paare. Heutzutage kreisen am Fermi National Laboratory in Batavia (Illinois) Antiprotonen und Protonen gegenläufig in gewaltigen Ringen. Wenn sie frontal zusammenstoßen, lassen sich Teilchenprozesse bei extrem hohen Energien erforschen.

Die ersten Antiatome wurden 1995 am Cern, dem europäischen Forschungszentrum für Teilchenphysik bei Genf, geschaffen. In einem Speicherring kreiste ein Strahl von Antiprotonen und kreuzte einen Strahl aus Xenon-Atomen. Gelegentlich produzierte eine Kollision ein Elektron-Positron-Paar, nach der das Positron und ein Antiproton zusammenblieben und ein Antiwasserstoff-Atom bildeten. Das Forscherteam beobachtete neun Antiatome, die fast mit Lichtgeschwindigkeit dahinrasten. 1998 entstanden bei einem ähnlichen Experiment am Fermilab sogar 57 Antiatome. ▷



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Antiwasserstoff-Atome bestehen aus einem Positron (rot), das um ein Antiproton (grün) kreist. In dieser fiktiven Darstellung driften einzelne Antiatome von ihrem Entstehungsort – oben außerhalb des Bilds – gegen die Wand der Vakuumkammer aus normaler Materie (blau). Atome und Antiatome vernichten einander, wobei ein Schauer energiereicher Teilchen entsteht.

▷ Doch mit derart schnell durchs Labor jagenden Antiatomen lässt sich wenig anfangen. Um sie näher zu untersuchen, möchten die Physiker sie in eine Atomfalle sperren, das heißt so wirksam abbremsen, dass die Restgeschwindigkeit einer Temperatur unter 0,5 Kelvin – einem halben Grad über dem absoluten Nullpunkt – entspricht. Dieses Ziel verfolgen am Cern zwei heftig konkurrierende Teams. Aus der Trap-Gruppe, die beim Einfangen und Kühlen von Antiprotonen Pionierarbeit geleistet hatte, ging die Atrap-Kollaboration unter Leitung von Gerald Gabrielse von der Harvard University hervor (siehe »Kühlung und Speicherung von Antiprotonen« von Gerald Gabrielse, Spektrum der Wissenschaft 2/1993, S. 44). Die von Cern-Forscher Rolf Landua geleitete Athena-Gruppe stieg spät in den Wettlauf ein, kam aber 2002 den anderen mit einer Fachpublikation, die den Nachweis kalter Antiwasserstoff-Atome meldete, um wenige Wochen zuvor. Ein weiteres Cern-Team, Asacusa, testet exotische Helium-Atome, in denen ein Antiproton eines der beiden Elektronen ersetzt.

Einige Wissenschaftler hoffen zwar, Antimaterie eines fernen Tages als Treibstoff für Raumschiffe verwenden zu können (siehe Kasten S. 69), doch zunächst verfolgen die Experimente mit Antiteilchen vor allem das Ziel, die so genannte CPT-Symmetrie zu erforschen. Sie regelt den Zusammenhang zwischen den Eigenschaften gewöhnlicher Partikel und ihrer jeweiligen Antiteilchen. Gemäß der Theorie sollten beide denselben physikalischen Gesetzen gehorchen. Mit genügend zahlreich eingefangenen Antiatomen könnten die Forscher überprüfen, ob Antiwasserstoff Licht bei exakt denselben Frequenzen absorbiert und emittiert wie Wasserstoff. Wenn die CPT-Symmetrie gilt, müssen beide Spektren vollkommen identisch sein.

Historisch betrachtet kann man bei den mit CPT verwandten Symmetrien nicht gerade von einer Erfolgsgeschichte sprechen: Bei jeder hat sich herausgestellt, dass sie nicht ausnahmslos gilt.

Verletzung der CPT-Symmetrie?

Jedes Mal, wenn eine vermeintlich unantastbare Symmetrie verletzt wurde, bescherte dies den überraschten Physikern neue Erkenntnisse über die fundamentalen Teilchen und Kräfte. Eine CPT-Verletzung durch Antiwasserstoff würde den Bruch der grundlegendsten Symmetrie überhaupt bedeuten und das physikalische Weltbild verändern.

Um einzusehen, warum die CPT-Symmetrie so wichtig ist, betrachten wir die Komponenten, für die ihre drei Buchstaben stehen: Ladungsumkehr C *(charge reversal)*, Paritätsoperation P und Zeitumkehr T *(time reversal)*. Die Ladungsumkehr ersetzt alle Teilchen durch ihre Antiteilchen. Die Paritätsoperation erzeugt ein Spiegelbild, genauer gesagt die räumliche Spiegelung eines Prozesses an einem Punkt. Die Zeitumkehr schließlich bewirkt, dass der Prozess rückwärts abläuft.

Das Athena-Experiment – hier gezeigt – und die Atrap-Anlage fabrizieren am Forschungszentrum Cern bei Genf kalten Antiwasserstoff.

Wenn wir sagen, dass die P-Symmetrie gilt oder die Natur unter Parität invariant ist, so meinen wir: Das Spiegelbild jedes physikalischen Prozesses gehorcht denselben Gesetzen wie der Prozess selbst. Offensichtlich gilt P, wenn wir vor einem Spiegel Ball spielen. Wie könnte die Parität nicht für jeden Vorgang gelten? Zur Verblüffung der Forscher wurde 1956 entdeckt, dass bei der schwachen Wechselwirkung, die bei radioaktiven Zerfällen eine Rolle spielt, die Parität verletzt ist. Der Zerfall von Kobalt-60 verläuft in der Realität anders als in einer Spiegelwelt. Ähnlich einem Tennisspieler, der seinen Schläger mit der rechten Hand führt – und dessen Spiegelbild deshalb Linkshänder ist –, weist der Zerfall von Kobalt-60 eine Händigkeit auf, die durch Spiegelung umgekehrt wird.

In vielen Fällen, in denen die P-Symmetrie gebrochen ist, gilt trotzdem die CP-Symmetrie. Das heißt, das Spiegelbild eines Antikobalt-Atoms verhält sich genau wie ein reales Kobalt-Atom. Der Anti-Tennisspieler ist gleichsam stets Linkshänder, sodass sein Spiegelbild rechtshändig spielt – genau wie der ursprüngliche Spieler. Überraschenderweise zeigte sich aber 1964, dass auch die CP-Symmetrie gelegentlich gebrochen ist. Obwohl die CP-Verletzung extrem selten auftritt, könnte sie erklären, warum es im Universum kaum Antimaterie gibt (siehe nebenstehenden Kasten).

Bleibt also nur die CPT-Symmetrie. Sie entspricht dem Spiegelbild eines rückwärts laufenden Films über Antiteilchen. CPT-Invarianz bedeutet, dass dieser doppelt manipulierte Antifilm exakt denselben Gesetzen gehorcht wie die Wirklichkeit; jede Abweichung würde eine CPT-Verletzung bedeuten.

Für die CPT-Symmetrie gibt es tiefe mathematische Gründe. Sie ist untrennbar verbunden mit den Gleichungen der Quantenfeldtheorie, welche die fundamentalen Teilchen und Kräfte beschreibt. Seit mehr als einem halben Jahrhundert beruht die gesamte theoretische Teilchenphysik auf der Quantenfeldtheorie;

Warum kommt Antimaterie so selten vor?

Als das Universum mit dem Urknall entstand, hätten aus der ursprünglichen Energie eigentlich gleiche Mengen von Materie und Antimaterie entstehen müssen. Wie kann daraus unser heutiges Universum hervorgegangen sein, in dem fast alles aus Materie besteht? Der große russische Physiker Andrej Sacharow gab 1967 eine Antwort: Eine notwendige Bedingung für eine solche Entwicklung ist die Verletzung der CP-Symmetrie. Dieser Symmetriebruch ermöglicht, dass Teilchen anders zerfallen als Antiteilchen.

Gegenwärtig untersuchen zwei Experimente – BaBar am Stanford Linear Accelerator Center in den USA und Belle in Tsukuba (Japan) – die CP-Verletzung beim Zerfall von seltenen Teilchen, so genannten B-Mesonen, und deren Antiteilchen. Im August 2004 meldeten beide Gruppen die direkte Beobachtung einer deutlichen CP-Verletzung: Ein spezieller B-Mesonen-Zerfall kommt viel häufiger bei den Teilchen vor als bei den Antiteilchen.

Bislang passt das beobachtete Ausmaß der CP-Verletzung gut in den Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik. Nur eine bestimmte Reaktion zeigt ein bisschen zu viel CP-Verletzung. Sollte sich das bestätigen, könnte es auf unbekannte Teilchen hinweisen (siehe »Neue Physik jenseits des Standardmodells« von Gordon Kane, Spektrum der Wissenschaft 9/2003, S. 26). Allerdings reicht die bisher beobachtete Größe der CP-Verletzung nicht aus, die Materie-Antimaterie-Asymmetrie unseres Universums im Rahmen von Sacharows Modell zu erklären.

CERN

die CPT-Verletzung würde ihren Zusammenbruch signalisieren. Das wäre ein wichtiger Hinweis auf »neue Physik« jenseits des bisherigen Standardmodells.

Aus Experimenten mit instabilen Teilchen konnten die Physiker bereits ableiten, dass jede mögliche Verletzung der CPT-Symmetrie sehr klein sein muss. Die Trap-Gruppe um Gabrielse bestätigte außerdem durch experimentellen Vergleich von eingefangenen Antiprotonen mit Protonen die CPT-Symmetrie für diese Teilchensorte mit bislang unübertroffener Genauigkeit. Aber die Suche muss mit noch größerer Präzision weitergehen, denn möglicherweise wird die CPT-Symmetrie noch subtiler verletzt (siehe »An den Grenzen von Einsteins Theorie« von Alan Kostelecký, Spektrum der Wissenschaft, Spezial 1/2005, S. 68). Die Wasserstoff-Spektroskopie ist extrem genau. Ließe sich die gleiche Präzision mit Antiwasserstoff erreichen, könnte ein Vergleich der beiden Spektren die bisherige CPT-Grenze für stabile Teilchen gehörig ausdehnen.

Außer gelegentlichen CPT-Verletzungen könnte Antimaterie auch auf die Schwerkraft anders reagieren als Materie. Das soll nicht heißen, die Antimaterie würde durch »Antigravitation« von normaler Materie abgestoßen, wie einige Leute fälschlich meinen. Doch eine winzige Komponente der Gravitation könnte bei Antimaterie umgekehrt wirken.

Eine solche Entdeckung würde unser Bild der Schwerkraft grundlegend wandeln. Versuche mit Positronen, Antiprotonen oder anderen geladenen Antiteilchen wären dafür völlig ungeeignet, weil elektrische und magnetische Streufelder viel zu stark stören würden. Man müsste neutrale Antiatome auf extrem tiefe Temperaturen bringen und im freien Fall beobachten, wie das mit lasergekühlten gewöhnlichen Atomen bereits geschieht. Solche Gravitationsexperimente sind allerdings technisch noch um Größenordnungen schwieriger als die CPT-Tests.

Um Antiwasserstoff-Atome herzustellen, brauchen wir zwei Zutaten: Positronen und Antiprotonen. Positronen sind relativ leicht zu bekommen: Sie werden von vielen radioaktiven Isotopen beim so genannten Beta-Zerfall emittiert. Doch Antiprotonen müssen gleichsam aus dem Nichts erschaffen werden.

Ausbruchsichere Teilchenfallen

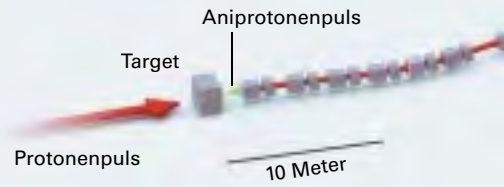
In den Cern-Experimenten dient Natrium-22 als Positronenquelle. Ein Gramm dieses Isotops emittiert pro Sekunde 200 Billionen Positronen. Doch die Partikel haben eine Energie von 550 keV (Kiloelektronenvolt); das entspricht einer Temperatur von sechs Milliarden Grad Celsius. Um für die Fabrikation von Antiwasserstoff zu taugen, müssen Positronen von ihrer Anfangsgeschwindigkeit – fast neun Zehntel der Lichtgeschwindigkeit – auf wenige Kilometer pro Sekunde abgebremst werden. Das lässt sich mit unterschiedlichen Prozessen erreichen (siehe Kasten auf der folgenden Doppelseite). Binnen fünf Minuten sammelt die Athena-Gruppe 75 Millionen Positronen in einer Penning-Falle. In einer solchen – 1936 von dem Physiker Frans Michel Penning erfundenen – Falle werden die Teilchen mit Hilfe von elektrischen und magnetischen Feldern in einem Hochvakuum festgehalten. Die Atrap-Anlage fängt hingegen »nur« rund fünf Millionen Positronen ein. Die Fallen sind nahezu ausbruchsicher: Selbst nach einer Stunde ist nur ein unbedeutender Teil der Positronen verloren gegangen.

Im Gegensatz zu Positronen werden Antiprotonen nicht einfach von radioaktiven Quellen emittiert; die Forscher müssen sie aus reiner Energie produzieren. Zu diesem Zweck beschießen sie ein Metall-Target mit Protonen, wobei unter anderem ein hochenergetischer Puls aus Antiprotonen entsteht. Um kalten Antiwasserstoff zu erzeugen, müssen die Wissenschaftler die Antiprotonen auf eine ähnlich tiefe Temperatur abkühlen – das heißt abbremsen – wie die Positronen. Für die erste Bremsphase wird die normale Beschleunigertechnik einfach umgekehrt eingesetzt. Seit 2000 besorgt dies am Cern der Antiproton-Decelerator.

Alle anderthalb Minuten emittiert dieser »Entschleuniger« einen Puls von rund 20 Millionen Antiprotonen. Sie haben nur noch ein Zehntel der Lichtgeschwindigkeit oder eine Energie von rund fünf MeV (Millionen Elektronenvolt). Durch ein dünnes Aluminiumfenster werden sie weiter abgebremst und schließlich in einer Penning-Falle auf eine Energie von wenigen Elektronenvolt verlangsamt. Die aus dem Decelerator kommenden Antiprotonenpulse werden sukzessive in der Falle gesammelt; ▷

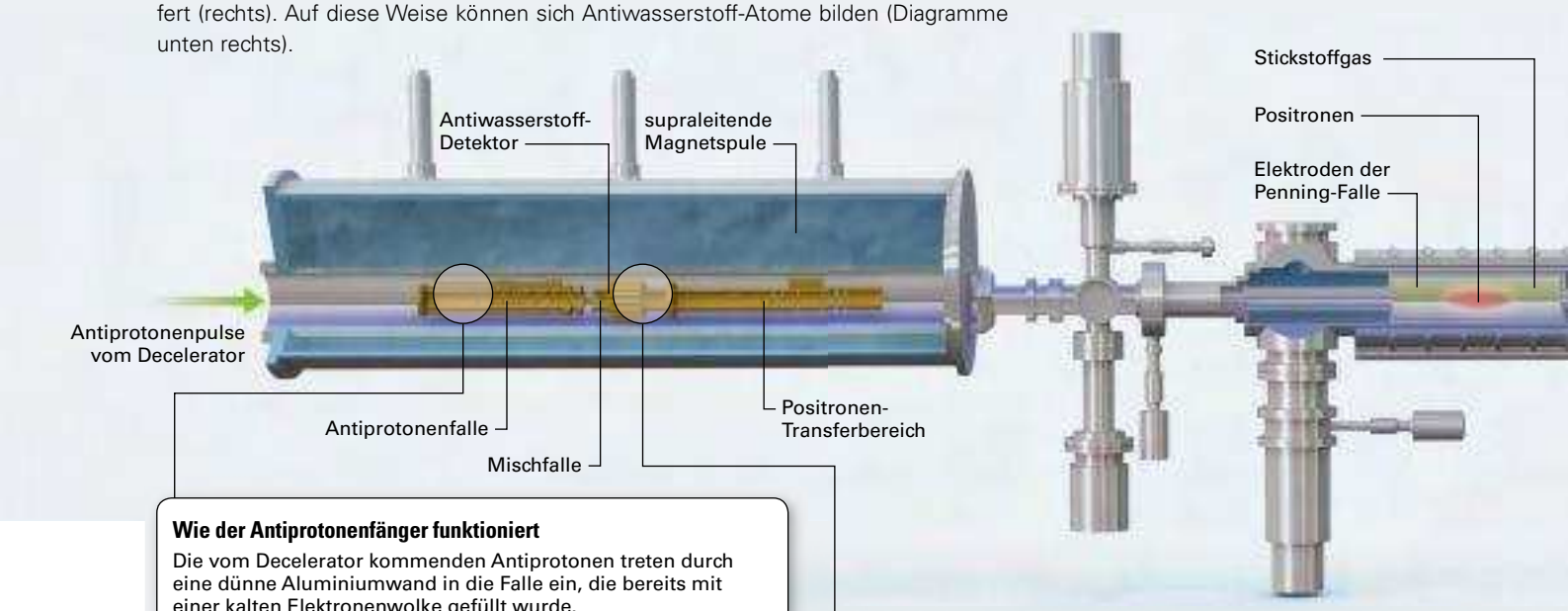
Herstellung und Nachweis von kaltem Antiwasserstoff

Um Antiwasserstoff-Atome zu fabrizieren, müssen die Physiker Antiprotonen und Positronen erzeugen und zueinander bringen. Der Antiproton-Decelerator am Cern beliefert drei Experimente – Atrap, Athena und Asacusa – mit Antiprotonen relativ niedriger Energie (rechts). Magnetische und elektrische Felder fangen die Antiprotonen sowie separat produzierte Positronen an den entgegengesetzten Enden einer Vakuumröhre ein (unten). Durch Manipulieren der Felder werden die Teilchen in einer Mischfalle zusammengeführt und bilden dort Antiwasserstoff-Atome, die ein Detektor nachweist. Das Prinzip der Mischfalle wurde von der Atrap-Gruppe und deren Vorläufer, dem Trap-Team, entwickelt. Die drei Diagramme ganz unten beziehen sich auf das Athena-Experiment.



Antiprotonenfänger und Mischfalle

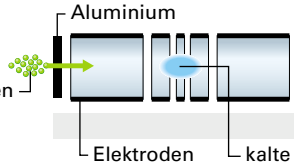
Der Antiprotonenfänger (links) sammelt Antiprotonenpulse, die aus dem Decelerator kommen (Diagramme unten links). Wenn sich genügend Antiprotonen angesammelt haben, werden sie in die Mischfalle befördert. Diese Falle hält die Antiprotonen auf engem Raum fest – zusammen mit den Positronen, die der Positronen-Akkumulator liefert (rechts). Auf diese Weise können sich Antiwasserstoff-Atome bilden (Diagramme unten rechts).



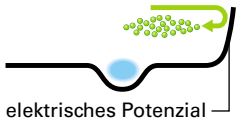
Wie der Antiprotonenfänger funktioniert

Die vom Decelerator kommenden Antiprotonen treten durch eine dünne Aluminiumwand in die Falle ein, die bereits mit einer kalten Elektronenwolke gefüllt wurde.

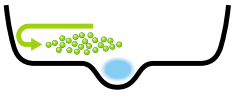
Das Aluminium bremst einige Antiprotonen.



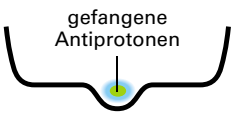
Eine hohe elektrische Potenzialbarriere reflektiert die gebremsten Antiprotonen zurück in die Falle. Hochenergetische Antiprotonen entkommen nach rechts.



Links wird rasch eine hohe Potenzialbarriere errichtet, sodass die Antiprotonen nun hin- und herreflektiert werden.



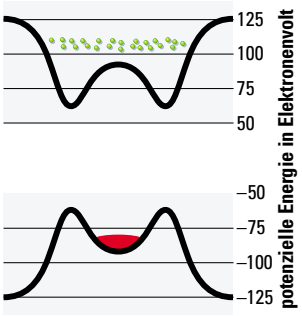
Bei jedem Durchgang verlieren die Antiprotonen Energie an die Elektronen und kommen schließlich in der Mitte der Falle zur Ruhe. Die linke Barriere wird gesenkt, um den nächsten Antiprotonenpuls einzulassen.



Wie die verschachtelte Mischfalle funktioniert

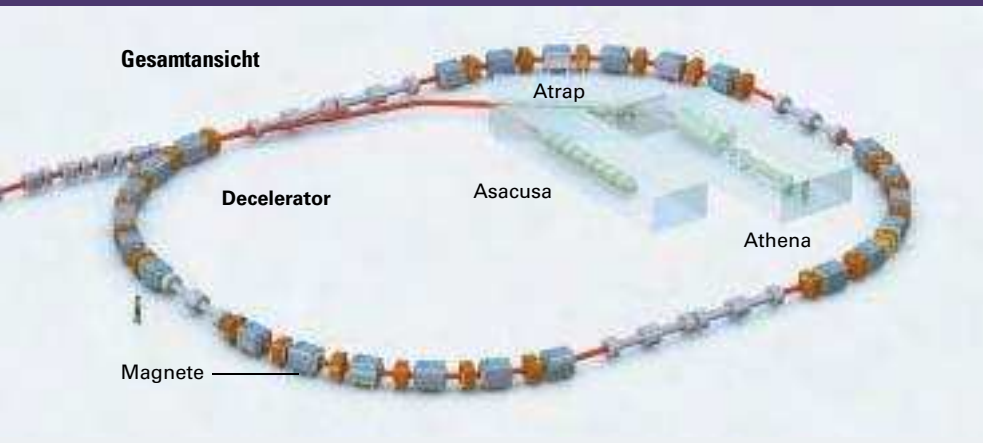
Da Positronen sich nicht im selben Potenzialtopf sammeln lassen wie die Antiprotonen, muss für sie eine eigene Falle innerhalb der Antiprotonenfalle eingerichtet werden.

Die Antiprotonen pendeln zwischen den Barrieren eines großen, tiefen Potenzialtopfs hin und her; der kleine Hügel in der Mitte stört sie nicht.

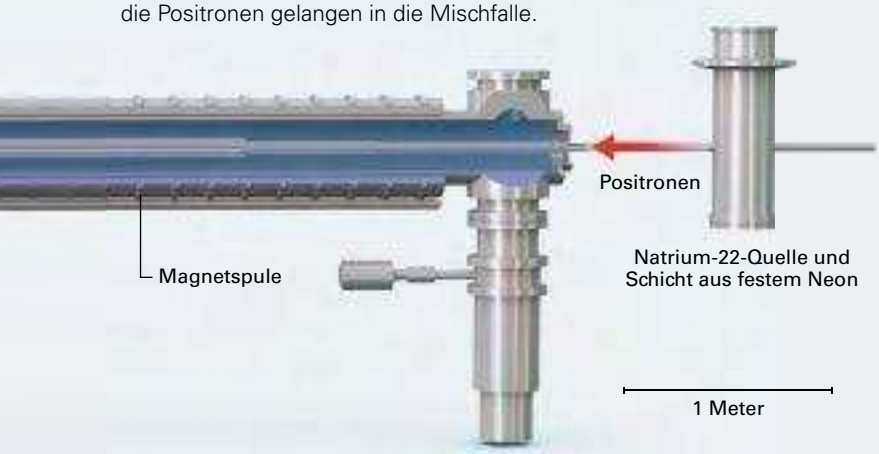


Da die Positronen entgegengesetzt geladen sind, erscheint ihnen das Potenzial umgekehrt: Der Hügel in der Mitte des Potenzialtopfs verwandelt sich in eine flache Mulde auf dem Gipfel eines großen Potenzialbergs.

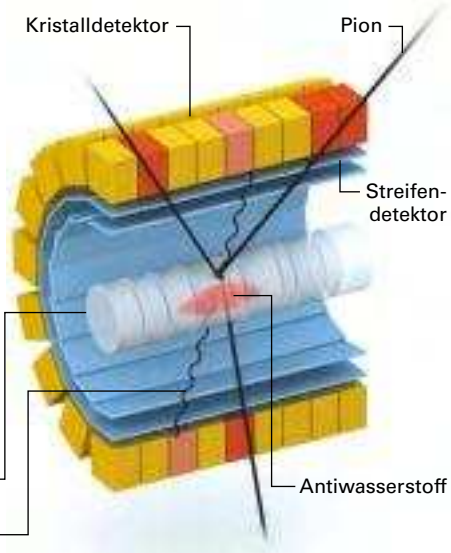
Diese Mulde hält die Positronen innerhalb des Gebiets fest, in dem sich die Antiprotonen aufhalten. So können sich Antiwasserstoff-Atome bilden.



Positronen-Akkumulator
Eine Natrium-22-Quelle (ganz rechts) emittiert Positronen, die zunächst durch eine dünne Schicht aus festem Neon und dann durch Kollisionen mit gasförmigem Stickstoff gebremst werden. Eine Penning-Falle fängt die verlangsamten Positronen ein. Haben sich genügend Positronen angesammelt, wird der Stickstoff abgepumpt und die Positronen gelangen in die Mischfalle.



Wie der Detektor funktioniert
Da die in der Mischfalle gebildeten Antiatome elektrisch neutral sind, entwischen sie und treffen auf die Wand der Vakuumkammer. Dort werden die Antiprotonen und die Positronen vernichtet. Dabei entstehen drei hochenergetische Pionen und ein Gammastrahlenpaar. Mehrere Schichten von Teilchendetektoren um die Mischfalle können diese Emissionen nachweisen.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

▷ dieses von der Trap-Gruppe erfundene Verfahren heißt Stacking (Stapeln). Die Athena-Falle vermag ihre 10 000 Antiprotonen viele Stunden lang festzuhalten. Atrap hat ein besseres Vakuum und hält eine halbe Million Antiprotonen sogar zwei Monate lang ohne messbare Verluste gefangen.

Der Einfang von geladenen Teilchen wurde schon vor Jahrzehnten entwickelt, doch die üblichen Fallen funktionieren nur, wenn alle Teilchen dasselbe Ladungsvorzeichen – dieselbe Polarität – haben. Zum Beispiel kann eine zylindrische Penning-Falle, die Positronen festhält, keine Antiprotonen einfangen. Bei diesem Fallentyp sperrt ein Magnetfeld die Teilchen radial ein, und ein elektrisches Feld errichtet Potenzialbarrieren an den beiden Enden des Zylinders.

Teilchen in der Weinflasche

Wir können uns die Positronen als Bälle vorstellen und das elektrische Potenzial als Rampe: Die Bälle rollen am Zylinderende die Rampe hinauf, werden langsamer und kehren schließlich um. Leider begegnen Antiprotonen wegen ihrer umgekehrten Polarität nicht einer Rampe, sondern einem Abhang, über den sie aus der Falle strömen und verloren gehen. Um Antiprotonen festzuhalten, müsste man das elektrische Feld umkehren. 1988 kam Gabrielse auf einen Trick, um Teilchen entgegengesetzter Polarität gemeinsam festzuhalten: Er platzierte eine seichte Falle für Teilchen der einen Polarität innerhalb einer tieferen Falle für Partikel der anderen Polarität. Die von den Außenbarrieren gefangene Teilchensorte bewegt sich wie in einer tiefen Mulde mit einer Erhebung in der Mitte – wie am Boden einer Weinflasche.

Für die andere Partikelsorte wirken die Potenziale umgekehrt: Aus dem Hügel in der Mitte wird eine Senke auf einer Bergspitze, die dort Teilchen festhält. Sowohl Atrap als auch Athena benutzen diesen Fallentyp, um Antiprotonen und Positronen gemeinsam gefangen zu halten. In der Mitte der verschachtelten Falle sammeln sich beide Teilchensorten. 1996 demonstrierten Gabrielse und sein Team das Prinzip erstmals mit Protonen und Elektronen, und 2001 fingen sie damit Antiprotonen und Positronen.

Durch Kollisionen zwischen den gefangenen Teilchen kommt es manchmal dazu, dass ein Positron und ein Antiproton dieselbe Bahn beschreiben. Prompt ▷

▷ beginnen sie einander zu umkreisen – ein Antiwasserstoff-Atom ist entstanden.

Nun stehen die Forscher vor zwei Problemen: Erstens müssen sie nachweisen, dass die Atome tatsächlich da sind; und zweitens müssen sie das flink tun, denn die Antiatome sind elektrisch neutral und werden deshalb von der Falle nicht länger festgehalten. Sie verlassen die Falle einfach mit der Geschwindigkeit, bei der sie zufällig entstanden sind.

Die Athena-Gruppe benutzt das zweite Problem, um das erste zu lösen. Wenn das entweichende Atom auf die Wand der Vakuumkammer trifft, wird es gestoppt. Fast sofort kommt es zur Paarvernichtung des Positrons mit einem Elektron der Wand, und ebenso wird das Antiproton in einem Atomkern vernichtet. Erstere Reaktion erzeugt zwei entgegengesetzt gerichtete Gammastrahlungsquanten mit der charakteristischen Energie von 511 keV, letztere zwei oder drei so genannte Pionen. All diese Teilchen sind relativ leicht nachzuweisen. Wenn in den Detektoren solche Gammastrahlen und Pionen erscheinen, die obendrein zur selben Zeit vom selben Ort der Wand ausgehen, dann wissen die Forscher, dass soeben ein zuvor erzeugtes Antiwasserstoff-Atom zerstört wurde.

Doch ganz so einfach geht es leider nicht. Einige Antiproton-Vernichtungen erzeugen einen Schauer von Positronen, diese ihrerseits 511-keV-Gammastrahlen – und mitunter werden just zwei davon nachgewiesen. So können einzelne Antiprotonen das Signal eines Antiwasserstoff-Atoms vortäuschen. Die Häufigkeit solcher falschen Signale muss in der Datenauswertung berücksichtigt werden.

Die Atrap-Gruppe nutzt eine völlig andere Technik, die dieses Problem von vornherein vermeidet. Das Team zählt nur diejenigen Antiwasserstoff-Atome, die zufällig die Achse des Fallenzylinders entlangwandern und zudem nur schwach gebunden sind; alle übrigen entkommen unentdeckt.

Zerlegung der Antiatome

Die speziellen Antiatome durchdringen, da sie elektrisch neutral sind, mühelos eine hohe Potenzialbarriere, an der alle nackten, nicht zu einem Antiatom gehörenden Antiprotonen zurückgewiesen werden. Danach begegnen die Antiatome einem starken elektrischen Feld, das sie wegen ihrer losen Bindung auseinander reißt. Schließlich werden die neuerdings nackten Antiprotonen in einer weiteren elektromagnetischen Falle gefangen. Nach einer Sammlungsphase werden diese Antiprotonen freigelassen und durch ihre Vernichtung in den Kammerwänden nachgewiesen.

Solange es in der verschachtelten Falle keine Positronen gibt, werden keine Antiprotonen nachgewiesen – was beweist, dass nackte Antiprotonen die Potenzialbarriere nicht überwinden und nicht in die zweite Falle gelangen können. Was gezählt wird, wenn die Positronen vorhanden sind, sind also tatsächlich die zufällig schwach gebundenen und in geeigneter Richtung wandernden Antiwasserstoff-Atome. Hintergrundereignisse müssen nicht abgezogen werden.

Bei einer raffinierten Weiterentwicklung dieser Methode dient ein oszillierendes elektrisches Feld zum Zerlegen der Antiatome; damit gelang es dem Atrap-Team, ihre Geschwindigkeit – oder ihre Temperatur – zu bestimmen. Das Ergebnis war eher ernüchternd: Die Antiatome hatten eine Temperatur von 2400 Kelvin – viel höher als die 4,2 Kelvin der mit flüssigem Helium gekühlten Komponenten der Falle.

Um Antiatome detailliert zu untersuchen, muss man ihre Temperatur deutlich unter 0,5 Kelvin senken. Nur dann kann man sie in einer Falle für neutrale Atome sammeln und sehen, wie sie Laserstrahlen unterschiedlicher Frequenz absorbieren.

Um kältere Antiatome zu erzeugen, hat die Atrap-Gruppe ein lasergesteuertes System entwickelt, das ohne verschachtelte Falle auskommt. Stattdessen werden Positronen und Antiprotonen separat festgehalten (siehe Kasten unten). Eine

Laserkontrollierte Produktion

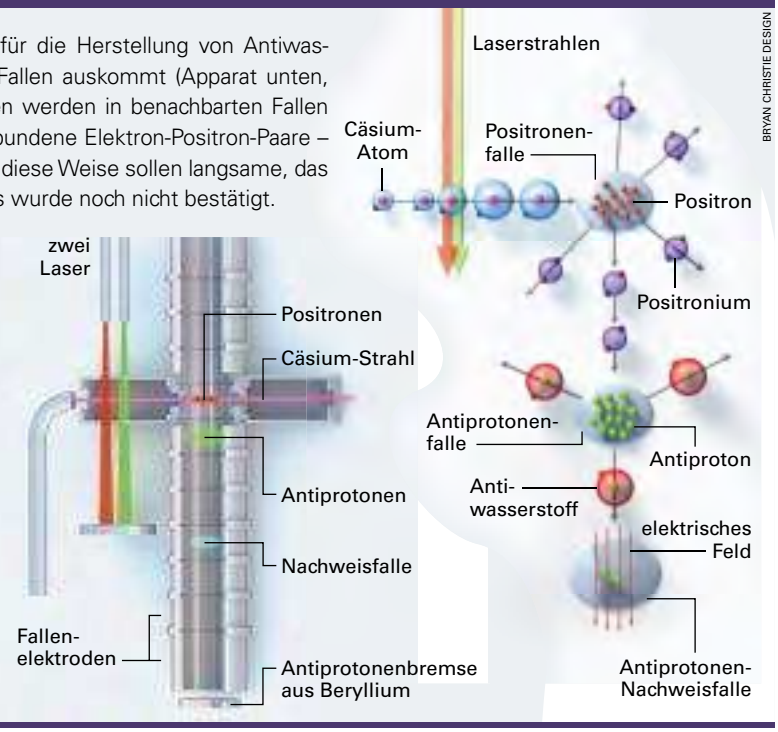
Die Atrap-Gruppe hat eine laserkontrollierte Methode für die Herstellung von Antiwasserstoff-Atomen entwickelt, die ohne verschachtelte Fallen auskommt (Apparat unten, Verfahren rechts). Die Antiprotonen und die Positronen werden in benachbarten Fallen festgehalten, und neutrale Positronium-»Atome« – gebundene Elektron-Positron-Paare – transportieren die Positronen zu den Antiprotonen. Auf diese Weise sollen langsame, das heißt kalte Antiwasserstoff-Atome entstehen, doch das wurde noch nicht bestätigt.

1 Cäsium-Atome aus einem Ofen durchqueren einen Laserstrahl, der sie in einen aufgeblähten, hochangeregten Rydberg-Zustand versetzt.

2 In einer Falle gefangene Positronen entreißen den Cäsium-Atomen angeregte Elektronen und bilden Positronium, das sich ebenfalls in Rydberg-Zuständen befindet. Da die Positronium-»Atome« elektrisch neutral sind, entweichen sie aus der Falle in alle Richtungen.

3 Einige Positronium-Atome erreichen eine Antiprotonenfalle, wo ihnen die Antiprotonen das Positron entreißen und Antiwasserstoff-Atome bilden. Die Antiatome entwischen wiederum in alle Richtungen.

4 Einige Antiwasserstoff-Atome gelangen zu einer zweiten Antiprotonenfalle, wo ihnen ein starkes elektrisches Feld die Positronen entzieht. Die nun gefangenen Antiprotonen werden nachgewiesen und beweisen, dass Antiwasserstoff-Atome entstanden sind.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Raumfahrt mit Antimaterie-Antrieb: nichts als Sciencefiction?

Nach Angaben der Nasa enthalten 43 Milligramm Antiprotonen ebenso viel Energie wie die 750 000 Kilogramm Treibstoff und Oxidationsmittel, die ein Spaceshuttle in seinem externen Tank mitführt. Eine derart konzentrierte Energiequelle wäre natürlich hochwillkommen, doch bevor ein Antimaterie-Raumantrieb Wirklichkeit werden kann, sind enorme Probleme zu überwinden.

Erstens: Wie produziert man einige Milligramm Antimaterie? Der Antiproton-Decelerator am Cern braucht für 20 Millionen Antiprotonen hundert Sekunden. Selbst wenn er ein Jahr lang pausenlos liefe, gäbe das nur zehn Pikogramm (billionstel Gramm) Antiprotonen.

Zweitens: Wie speichert man größere Mengen von Antimaterie? Typische Fallen für neutrale Atome halten höchstens einige Millionen Atome fest. Steven D. Howe und Gerald P. Jackson von der Firma Hbar Technologies schlugen 2003 auf einer Nasa-Konferenz vor, Antiwasserstoff in Form fester Kügelchen (Pellets) zu lagern, denn Antiwasserstoff gefriert – genau wie Wasserstoff – bei 14 Kelvin. Die rund 150 Mikrometer großen Pellets würden elektrisch aufgeladen und in elektrostatischen Fallen festgehalten.

Drittens: Wie wandelt man die Vernichtungsenergie in Schubkraft um? Bei der Paarvernichtung von Elektron und Positron wird die Energie in Form von zwei entgegengesetzt gerichteten Gammastrahlen frei. Die Proton-Antiproton-Vernichtung erzeugt Pionen – kurzlebige Teilchen hoher Energie. Diese Teilchen könnten ein Stück Wolfram aufheizen, das von Wasserstoff umströmt wird. Die thermische Expansion des Wasserstoffs würde Schub liefern.

Viel wirksamer wäre ein Antrieb, bei dem die Pionen durch magnetische Felder ausgerichtet würden und selbst den Treibstoff bildeten. Die gesamte Schubkraft wäre allerdings wegen der winzigen Treibstoffmenge ebenfalls winzig.

Howe und Jackson schlugen einen dritten Weg vor, bei dem ihre Antimaterie-Pellets ein Segelsystem antreiben: Ein mit Uran beschichtetes Kohlenstoffsegel wird mit festen Antiwasserstoff-Pellets beschossen, die im Uran Kernspaltungen auslösen. Der Ausstoß der Spaltprodukte treibt das Segel an, das wiederum das Raumschiff hinter sich herzieht. Dass die Antimaterie tatsächlich genügend wirksame Spaltprozesse auslöst, ist freilich reine Spekulation.

Bei diesem hypothetischen Raumantrieb lösen Antimaterie-Kügelchen Kernexplosionen in einem mit Uran beschichteten Segel aus.

Reaktionskette, die mit einem Strahl laserangeregter Cäsium-Atome beginnt, transportiert die Positronen zu den Antiprotonen, um den Antiwasserstoff zu erzeugen. Die Reaktionskette ist so konstruiert, dass möglichst wenig Energie auf das entstehende Antiatom übergeht.

Die Atrap-Gruppe konnte dieses Experiment nur wenige Stunden lang am Ende ihrer Experimentierzeit im Jahr 2004 durchführen. Darum blieb keine Zeit, allzu viele Antiatome zu sammeln. Tatsächlich wurden insgesamt nur 14 nachgewiesen. Gabrielse sieht »gute Gründe zu der Annahme, dass diese Atome viel kälter sind als die in einer verschachtelten Penning-Falle erzeugten«.

Für den Beweis dieser Vermutung sind aber viel mehr Atome nötig. Und selbst dann fehlt noch ein Schritt, bis die Antiatome zum Präzisionstest der CPT-Symmetrie taugen: Die Antiatome entstehen in so genannten Rydberg-Zuständen, und diese aufgeblähten, hoch angeregten Zuständen müssen erst »abgeregt« werden, damit eine spektroskopische Untersuchung durchführbar ist.

Ebenfalls Ende 2004 gelang es der Athena-Gruppe, ihre Antiprotonen im Zentrum ihrer Falle zu einer dünnen, dichten Säule zu komprimieren. Eine solche Konfiguration könnte sehr nützlich für künftige Experimente sein, bei denen magnetische Fallen die Antiwasserstoff-Atome festhalten sollen.

Zusätzlich hat die Athena-Gruppe den Antiwasserstoff-Produktionsprozess genauer untersucht. Wie sich herausstellte, entstehen selbst dann, wenn ihre Positronen Raumtemperatur (300 Kelvin) besitzen, fast ebenso viele Antiatome wie bei den sonst im Athena-Experiment üblichen zehn Kelvin. Das steht in krassem Widerspruch zu den einfachsten Theorien über die Bildung der Antiatome, wonach tausend- bis millionenmal weniger Antiwasserstoff entstehen müsste. Landua ist überzeugt, dass irgendein zusätzlicher Mechanismus hilft, den Antiwasserstoff im heißen Plasma zu stabilisieren; Gabrielse glaubt das nicht. Falls dieser Prozess die Antiatome tatsächlich in ihren – für die Spektroskopie erwünschten – Grundzustand versetzt, könnte ein Test der CPT-Symmetrie in greifbare Nähe rücken.

Beide Forscher halten die Produktion von Antiwasserstoff-Atomen, die sich für die Spektroskopie eignen, für die zentrale Herausforderung, vor der die Cern-Teams jetzt stehen. Solche Antiatome müssen zwei Forderungen erfüllen: Sie sind kälter als 0,5 Kelvin, damit magnetische Fallen sie festhalten können, und sie befinden sich im Grundzustand.

Der Antiproton-Decelerator ist normalerweise jedes Jahr von Mai bis November in Betrieb. Doch 2005 wird er gar nicht arbeiten – die Cern-Beschleuniger wurden abgeschaltet, weil der Bau des Large Hadron Colliders mehr kostet als geplant. Die Antiatomforscher müssen bis Mai 2006 warten; erst dann können sie wieder versuchen, den bösen Zwilling des Wasserstoffs zu bändigen. ◁

Graham P. Collins ist Redakteur bei Scientific American.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Antimaterie. Auf der Suche nach der Gegenwelt. Von D. B. Herrmann. C.H.Beck, München 2004

First measurements of the velocity of slow antihydrogen atoms. Von G. Gabrielse et al. in: Physical Review Letters, Bd. 93, S. 073401-1, 2004

Production and detection of cold antihydrogen atoms. Von M. Amoretti et al. in: Nature, Bd. 419, S. 456, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Sind wir gegen eine Pandemie gewappnet?

Jederzeit könnte wieder ein hochgefährliches Grippevirus über den Globus fegen und dabei Millionen von Menschenleben fordern. Mit Überwachungsmaßnahmen, Medikamenten und neuen Impfstoffen besteht die Chance, eine Katastrophe zu verhindern.

Von W. Wayt Gibbs, Christine Soares und Achim G. Schneider

Hongkong, Mai 1997: Ein dreijähriger Junge mit hohem Fieber und schwerer Lungenentzündung wird in ein Krankenhaus eingeliefert. Keine Behandlung schlägt an. Wenige Tage später verstirbt er. Zwei Monate brauchen die Wissenschaftler, bis sie schließlich die Ursache der Erkrankung herausfinden. Ein Vogelgrippevirus hatte den Jungen befallen: das erste Opfer von Influenza A vom Subtyp H5N1. Bis Ende des Jahres erkranken in der Weltmetropole weitere 17 Menschen; fünf davon erliegen ihrer Infektion.

Das Virus wütet gleichzeitig in Hühnerfarmen und auf Geflügelmärkten. Um eine Ausbreitung der Seuche zu verhindern, lassen die Behörden in den letzten drei Tagen des Jahres 1,5 Millionen Zuchtvögel töten. Die Gefahr war fürs Erste gebannt.

Ende 2003 schlägt H5N1 erneut zu, diesmal auf Hühnerfarmen in Korea. Das inzwischen veränderte Virus verbreitet sich rasant in Südostasien. Glücklicherweise gelingt es ihm nur ausnahmsweise, die Artenbarriere zum Menschen zu überwinden: Der Erreger hat zwar inzwischen mehr als 100 Millionen Vögel infiziert, bis Ende November 2005 sind aber lediglich 133 Menschen erkrankt, die meisten nachweislich nach direktem Kontakt mit infizierten Vögeln oder deren Exkrementen.

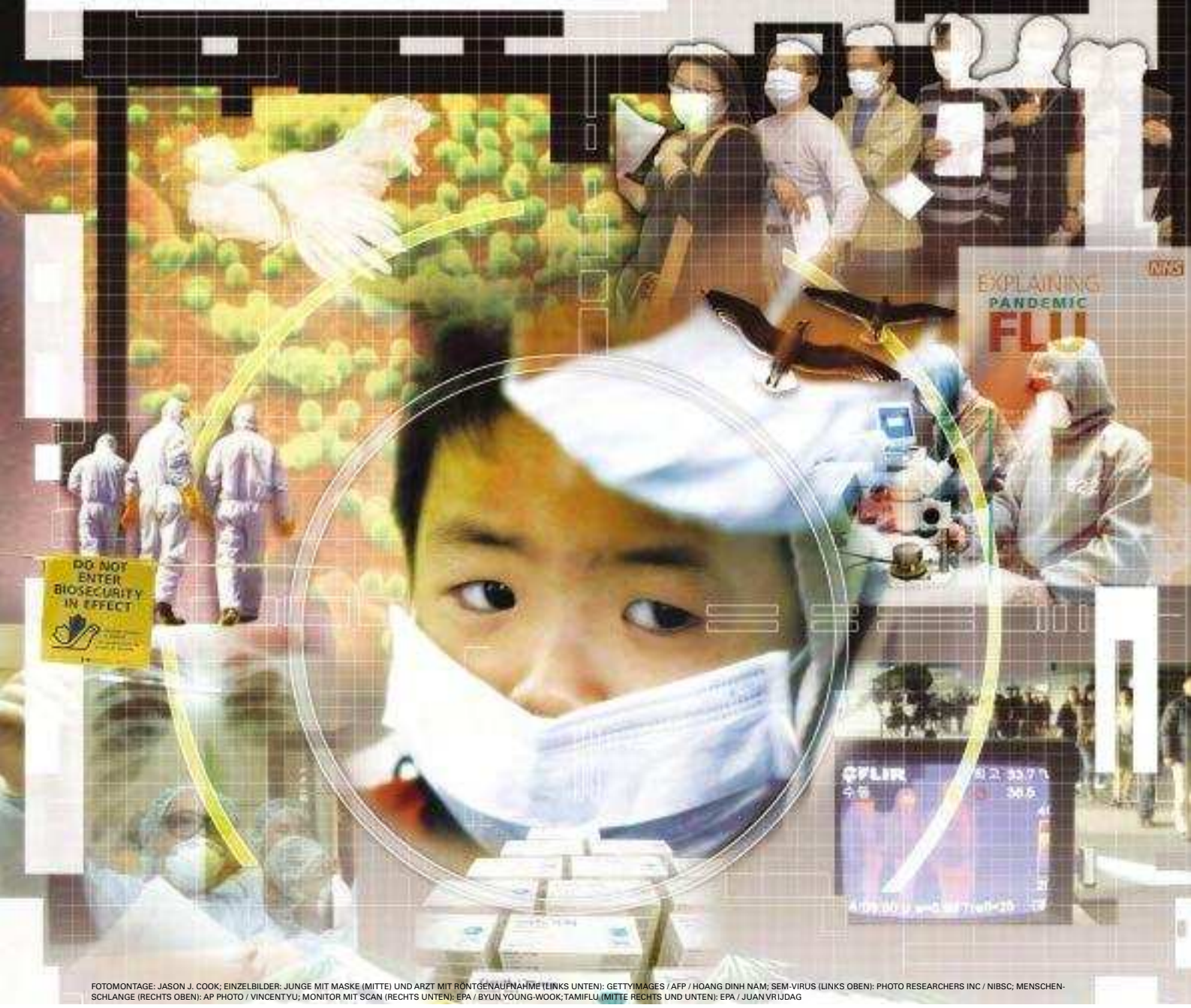
Doch was ist, wenn ein Vogelvirus – ob H5N1 oder ein anderer Subtyp – sich weiter an den Menschen anpasst? Wissenschaftlern zufolge bewegen wir uns wieder auf eine Grippepandemie zu, einer weltumspannenden Seuche, wie sie uns im 20. Jahrhundert dreimal heimgesucht hat.

Um die Gefahr richtig einzuschätzen, muss man vor allem eines begreifen: Eine schwere Influenzapandemie hat in ihrem Ausmaß wenig mit der alljährlichen Grippeepidemie gemein, die jedes Winterhalbjahr wiederkehrt, auch wenn beide durch Influenzaviren ausgelöst werden. Schon gar nicht dürfen wir Virusgrippen mit grippalen Infekten verwechseln – die fallen in die Kategorie »Erkältung«. Eine Pandemie tritt auf, wenn zwei Voraussetzungen erfüllt sind:

- Der Erreger muss sich von früheren Varianten so stark unterscheiden, dass kaum eine erworbene Immunität in der Bevölkerung besteht.
- Er muss außerdem durch Niesen, Husten oder Körperkontakt leicht von Mensch zu Mensch übertragen werden können.

IN KÜRZE

- Wissenschaftler warnen vor einer künftigen **globalen Grippeepidemie** mit dramatischen Folgen für die Gesundheit und das gesamte öffentliche Leben.
- Eine solche Pandemie kann bald oder erst in einigen Jahren auftreten. Der Tod von über 60 Menschen in Asien durch das Vogelgrippevirus H5N1 **mahnt aber zu raschem Handeln.** Es besitzt, wenn es sich weiter dem Menschen anpasst, das Potenzial zu einem Pandemievirus.
- Das globale **Surveillance-Netzwerk muss ausgebaut werden,** um jegliche gefährlichen Virenstämme schnell zu identifizieren.
- Gezielte Impfstoffe gegen den neuen Grippeerreger werden nicht rechtzeitig verfügbar sein, um eine beginnende Pandemie zu stoppen. Doch **ein rascher Einsatz antiviraler Medikamente** dürfte in dieser Phase Zeit gewinnen helfen.
- Wie schwer Infizierte erkranken werden, hängt von den Eigenschaften des Pandemiestamms ab. **In vielen Teilen der Welt** wird das Gesundheitswesen völlig überfordert sein.



FOTOMONTAGE: JASON J. COOK; EINZELBILDER: JUNGE MIT MASKE (MITTE) UND ARZT MIT RÖNTGENAUFNAHME (LINKS UNTEN): GETTYIMAGES / AFP / HOANG DINH NAM; SEM-VIRUS (LINKS OBEN): PHOTO RESEARCHERS INC / NIBSC; MENSCHEN-SCHLANGE (RECHTS OBEN): AP PHOTO / VINCENT YU; MONITOR MIT SCAN (RECHTS UNTEN): EPA / BYUN YOUNG-WOOK; TAMIFLU (MITTE RECHTS UND UNTEN): EPA / JUAN VRIJDAG

Grippepandemien kommen unverhofft einmal pro Generation vor, grob gesehen. Die letzten drei haben 1918, 1957 und 1968 zugeschlagen. Der erste Zündfunke entsteht, wenn einer der zahlreichen Stämme, die in Wild- oder Zuchtvögeln zirkulieren, so mutiert, dass er auch Menschen zu befallen vermag. Hat ein Virus erst einmal diese Hürde überwunden, kann es sich seinem neuen Wirt weiter anpassen – teilweise schlagartig – und dadurch für Menschen hochinfektiös werden. Besonders gefährlich wird der Erreger, wenn es ihm gelingt, außer dem Lungengewebe noch andere Bereiche des Körpers zu infizieren. Dann nimmt die Krankheit sehr häufig einen schweren, manchmal tödlichen Verlauf.

Eine heftige Pandemie vermag leicht mehr Opfer in einem Jahr zu fordern als Aids in 25 Jahren. Wie Epidemiologen befürchten, könnte dabei ein Drittel der Weltbevölkerung erkranken, viele müssten stationär behandelt werden. Mit insgesamt 10 bis 100 Millionen Todesopfern wäre dann zu rechnen. Kein Land, kein Volk und keine Einkommensgruppe blieben verschont. Sicheren Schutz vor Ansteckung gäbe es nicht.

Der Weg ist geebnet

Wissenschaftler können im Voraus weder wissen, welcher Virusstamm eine Pandemie auslösen, noch wann eine solche zuschlagen wird. Nur eines ist gewiss: Die nächste weltumspannende Seuche wird kommen und der Weg dahin ist inzwischen geebnet. Der bedrohliche Subtyp des Vogelgrippevirus, der erst seit 1997 unter Vögeln in Asien grassiert, hat im Oktober 2005 Europa erreicht. H5N1 schafft es zwar bisher nur in Ausnahmefällen, Menschen zu befallen. Doch wenn, dann ist es oft tödlich. Von den bis Ende November 133 Infizierten sind 68 ihrer Krankheit erlegen. Sollte das Virus sich weiter anpassen und dann leicht von Mensch zu Mensch springen, droht von ihm eine Pandemie. Die wachsende Bedrohung hat inzwischen Regierungen und Gesundheitsexperten ▷

Die Welt hat erstmals die Chance, die Folgen eines Pandemievirus zu minimieren, wenn es zuschlägt. Der Erfolg wird davon abhängen, inwieweit die reichen Länder die armen im Kampf gegen die Seuche unterstützen.

▷ in aller Welt wachgerüttelt. Im Dezember 2004 forderte die Weltgesundheitsorganisation (WHO) eine Überarbeitung des Pandemieplans. Diese erschien im April 2005. Im selben Monat hat Deutschland nach jahrelangem Ringen einen nationalen Pandemieplan veröffentlicht, basierend auf einem Entwurf einer Expertengruppe unter der wissenschaftlichen Federführung des Robert Koch-Instituts (RKI) in Berlin. Im November diskutierten Vertreter von hundert Ländern bei einem WHO-Treffen über einen globalen Aktionsplan, dessen Umsetzung rund eine Milliarde US-Dollar erfordert. Auf einer Geberkonferenz, die für Januar 2006 in Peking anberaumt ist, soll die Finanzierung beschlossen werden.

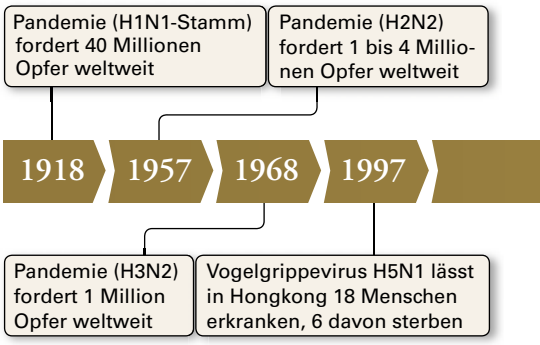
Alarmstufe drei

Das A und O zur Bekämpfung einer neuen Form von Grippe ist, Infektionen schnell zu erkennen. Auf internationaler Ebene koordinieren drei Behörden die weltweiten Anstrengungen, Erreger wie H5N1 aufzuspüren. Die WHO mit 110 Influenzazentren in 83 Ländern verfolgt Infektionen bei Menschen. Die Welttiergesundheitsorganisation (OIE, ehemals Office International des Épizooties) und die Welternährungsorganisation (FAO) sammeln Berichte über Ausbrüche der Krankheit bei Tieren. Aber die so genannten Surveillance-Netzwerke sind – wie die Verantwortlichen selbst zugeben – immer noch zu lückenhaft und zu langsam.

Auf Schnelligkeit kommt es jedoch gerade an, wenn man es mit rasch wirkenden Erregern zu tun hat, die über die Luft übertragen werden. Die Verantwortlichen dürften keine realistische Chance haben, eine Influenzapandemie im Keim zu ersticken, wenn sie den Verursacher nicht in den ersten 30 Tagen in den Griff bekommen (siehe auch Kasten S. 78). Die Uhr beginnt zu ticken, sobald sich der erste »pandemiefähige« Stamm von Mensch zu Mensch verbreitet.

Um das kritische Ereignis nicht zu verpassen, ist eine permanente und weltumspannende Überwachung der kursierenden Stämme vonnöten. Auf welchem Weg werden sie übertragen und auf welche Weise verändern sie sich? Zur Beantwortung dieser Fragen im aktuellen Fall benötigen Virologen nun Proben von möglichst jedem neuen H5N1-Patienten. Indem sie Gensequenzen von Influenzaviren vergleichen, können sie Veränderungen identifizieren. Diese entstehen entweder schrittweise durch Zufallsmutationen oder sprunghaft, indem verschiedene Influenzastämme, die gemeinsam einen Wirt – ob Mensch oder Tier – infiziert haben, darin Elemente ihres Erbguts untereinander austauschen (siehe den Kasten unten). Die WHO analysiert dann die Merkmale und das Verhalten der neuen Varianten.

Anhand dieser Informationen legt die WHO fest, welche Stufe auf dem Weg zu einer Pandemie erreicht ist. Der überarbeitete Plan vom April 2005 unterscheidet dabei sechs Phasen. Die begrenzten Ausbrüche der menschlichen H5N1-Grippe haben Phase 3 ausgelöst. Von der sechsten Stufe, die bei einer umfassenden Pandemie ausgerufen wird, sind wir also noch ein Stück entfernt.

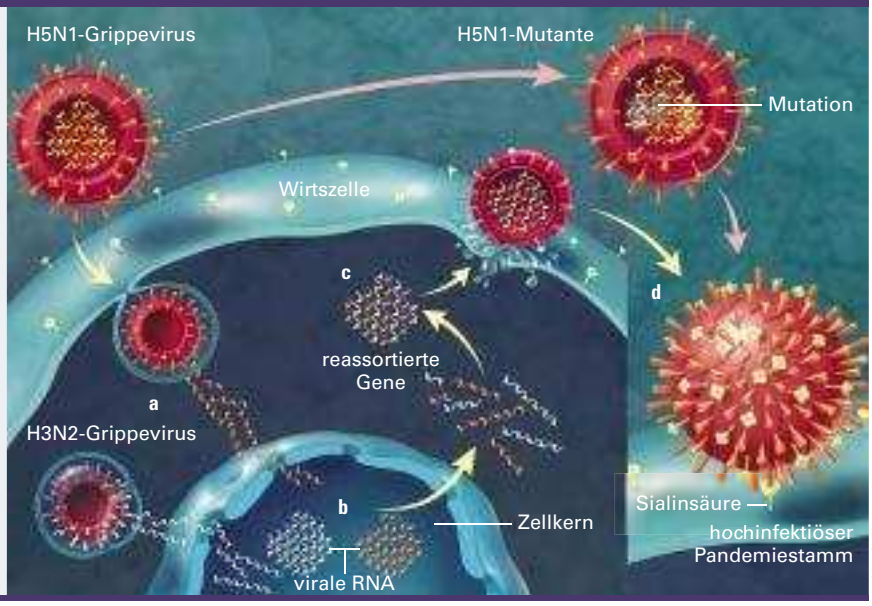


Die nächste Pandemie könnte zwar überall ausbrechen, auch in Europa. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass der neue Erreger in Asien startet. Das tun auch die meisten Stämme, welche die alljährlichen, saisonalen Grippeepidemien verursachen. Der natürliche Wirt für Influenzaviren sind Wasservögel wie Enten und Gänse, die wiederum Hühner infizieren können. Viele Asiaten leben mit ihrem Federvieh eng zusammen. Die Seuchenüberwachung ist vielerorts jedoch noch sehr lückenhaft – obwohl die Unterstützung durch die WHO und andere Organisationen langsam auch in abgeschiedene Gegenden gelangt.

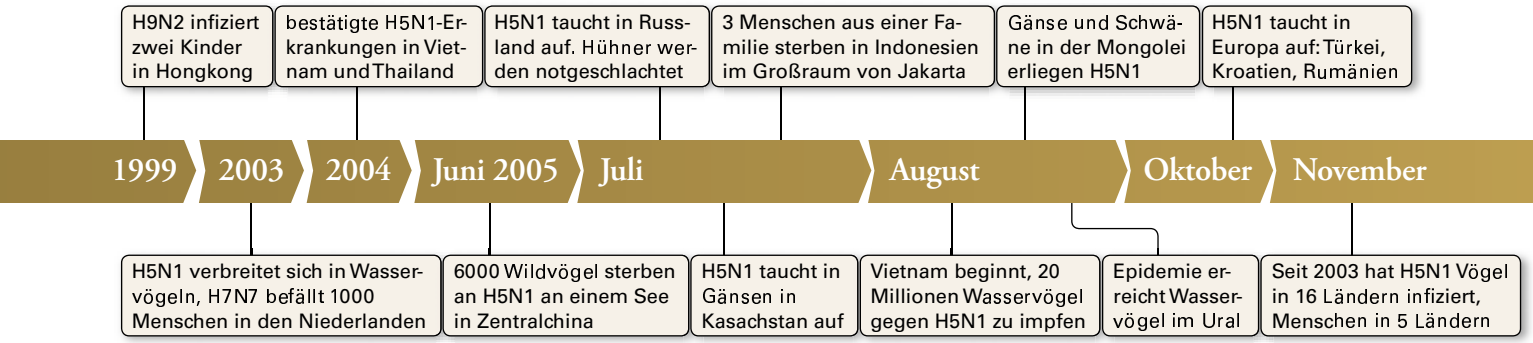
Ein Ausbruch von H5N1 in Indonesien verdeutlicht Schwierigkeiten, aber auch Fortschritte im Umgang mit der Gefahr. In einem recht wohlhabenden Vorort von Jakarta erkrankte Ende Juni

Wie ein Pandemiestamm entsteht

Subtypen von Influenza A, wie H5N1, die zunächst nur Vögel infizieren, können auf zwei verschiedenen Wegen zu einem »pandemiefähigen« Grippeerreger mutieren, der gut an bestimmte molekulare Strukturen auf menschlichen Zellen andockt. Der eine Weg: Das Virus erwirbt Punktmutationen, die ihm ein besseres Eindringen in menschliche Zellen ermöglichen (rosarote Pfeile). Der andere (gelbe Pfeile): Zwei Influenzastämme mit verschiedenen Eigenschaften befallen gleichzeitig eine Zelle (a) und setzen virale RNA frei, die sich im Zellkern massenhaft vermehrt (b). Vermischt sich die RNA der beiden Stämme zu einem Satz so genannter reassortierter Gene (c), kann ein neuer hochinfektiöser Stamm entstehen.



ALICE Y. CHEN



letzten Jahres die achtjährige Tochter eines Wirtschaftsprüfers in den Diensten der Regierung. Ein Arzt verordnete Antibiotika, doch ihr Fieber verschlimmerte sich, sodass er sie am 28. Juni in ein Krankenhaus überwies. Eine Woche später wurden auch ihr Vater und ihre einjährige Schwester mit Husten und Fieber eingeliefert. Am 9. Juli verstarb die Jüngste, drei Tage später der Vater.

Am nächsten Tag alarmierte ein scharfsinniger Arzt die Gesundheitsbehörde und schickte Blut- und Gewebeproben zu einem medizinischen Forschungslabor der US-Marine in Jakarta. Am 14. Juli verstarb auch das ältere Kind. Wie aus einem internen Patientenbericht hervorgeht, hatte indonesisches Laborpersonal am selben Tag herausgefunden, dass zwei der drei Familienmitglieder mit H5N1 infiziert waren. Die Regierung erkannte die Befunde jedoch erst an, als ein WHO-Labor in Hongkong sie am 22. Juli bestätigte.

Das Gesundheitsministerium ließ daraufhin mehr Krankensäle für Grippepatienten bereit machen. Gleichzeitig bat der Beauftragte für Seuchenbekämpfung in Indonesien, I Nyoman Kandun, die WHO um Unterstützung bei der weiteren Untersuchung des Falls. Wäre dies bereits der Beginn einer Pandemie gewesen, so hätte sich das Zeitfenster der ersten dreißig Tage, das zur Eindämmung zur Verfügung steht, bereits geschlossen. Zwei Wochen später ließ Kandun die Untersuchungen abbrechen. Begründung: »Wir konnten keinen Hinweis darauf finden, wo die Betroffenen sich infiziert hatten.«

Autopsien der drei Grippeopfer scheiterten an lokalen Traditionen, die ein solches Vorgehen verbieten. Generell seien an H5N1 Verstorbene bisher fast nie autopsiert worden, moniert Klaus Stöhr, Leiter des Globalen Influenzaprogramms der WHO. Zahlreiche Fragen bleiben somit unbeantwortet. Welche Organe befällt der Erreger? Welche Gewebe werden dabei am meisten geschädigt? Wie reagiert das Immunsystem?

Auch gebe es zu wenig Informationen, welche Rolle Zugvögel bei der Verbreitung über Ländergrenzen hinweg spielen, bemängeln Epidemiologen. Im Juli tauchte H5N1 zum ersten Mal bei Hausgeflügel in Sibirien auf, später in Kasachstan und dann in Russland. Im Oktober erreichte das Virus schließlich Europa. Wie sich die Tiere infizierten, bleibt nach wie vor ein Rätsel. Zugvögel stehen im Verdacht, das Virus auf dem Flug in ihre Winterquartiere zu verbreiten. Möglicherweise spielt aber auch der Transport infizierter Tiere durch den Menschen eine Rolle.

Prototyp-Impfstoffe gegen H5N1

Unzufrieden mit den vielen ungeklärten Fragen hat Stöhr zusammen mit anderen Grippeexperten ein weltweites Einsatzkommando ins Leben gerufen, das Maßnahmen gegen die drohende Pandemie überwachen soll. Im August 2005 beantragte die OIE zusätzliche Gelder für Surveillance-Programme, die sie zusammen mit der FAO und WHO organisiert. Im Januar 2006 in Peking wird die Finanzierung verbesserter Surveillance-Netzwerke ein wichtiger Aspekt sein.

In Deutschland erfolgt die Surveillance unter der Federführung des Robert Koch-Instituts (RKI) in Berlin. Zusätzlich zur prinzipiellen Meldepflicht von Grippefällen stützt sie sich auf die freiwillige Mitarbeit von mehreren hundert Arztpraxen quer durch die Bundesrepublik. Dort werden sämtliche auftretenden Erkrankungen der Atemwege erfasst, beschrieben und zur Auswertung an das RKI weitergeleitet. In ausgewählten Praxen wird Patienten mit Grippeverdacht zusätzlich ein Abstrich der Mundschleimhaut entnommen, ein Schnelltest durchgeführt oder der Abstrich an das Nationale Referenzzentrum in Berlin geschickt, das den Erreger eingehend analysiert. Dorthin geht jedes in Deutschland isolierte Influenzavirus.

Für den Ernstfall gilt es allerdings, die vorhandenen Strukturen weiter zu entwickeln. Neben einer ganzjährigen Surveillance – ein Pandemievirus hält sich nicht an die Grippesaison – müssten die Meldungen künftig völlig auf elektronischem Weg erfolgen. Der Pandemieplan empfiehlt außerdem, die Daten von Krankenhäusern besser zu integrieren sowie nach Altersgruppen aufgeschlüsselt zu registrieren, wie viele Menschen durch Grippe sterben. Alle Komponenten sollen dazu beitragen, Eigenschaften und Ausmaß einer Pandemie zeitnah zu erfassen, um schnell reagieren zu können.

Wie steht es mit Impfstoffen? Pocken- und Poliopandemien hatten einst verheerende Auswirkungen auf die Menschheit. Dank flächendeckender Impfungen wurden die Pocken offiziell ausgerottet, bei Polio ist man fast so weit. Leider wird eine solche Strategie gegen Influenza nicht greifen – weil die Viren verbreitet in Wildvögeln vorkommen.

Die Grippeerreger sind zudem sehr wandlungsfähig. Entsprechend muss der Impfstoff gegen die saisonale Influenza jährlich neu zusammengestellt werden. Als Grundlage dienen die drei jeweils am häufigsten zirkulierenden Stämme. Zur Herstellung des so genannten Saatvirus wird ein abgeschwächter Impfstamm mit der Virusvariante kombiniert, gegen die immunisiert werden soll. Von der Variante stammen dabei zwei Gensegmente, die für die viralen Oberflächenproteine Hämagglutinin (H) und Neuraminidase (N) kodieren. In Impfstofffabriken injizieren Roboter das fertige Saatvirus in bebrütete Eier, wo es sich massenhaft vermehrt. Schließlich wird das Virus auf biochemischem Weg in seine Bestandteile zerlegt, um Schlüsselproteine für die ▷

EPA

An Vogelgrippe Erkrankte in einem Hospital von Hanoi (Vietnam): Im März 2005 befanden sich ein junger Mann (links) und seine 14 Jahre alte Schwester (rechts) in einem kritischen Zustand. Bei einer H5N1-Infektion erkranken oftmals gesunde junge Erwachsene und Kinder besonders schwer und sterben.

▷ Impfung zu gewinnen. Diese so genannten Antigene regen das Immunsystem dazu an, Antikörper gegen das neue Virus herzustellen. Der fertige Impfstoff enthält Antigene aller drei Stämme.

Derzeit wird fieberhaft an einem Impfstoff gegen ein potenzielles Pandemievirus gearbeitet. Aber wie soll ein Impfstoff gegen eine Erregerform produziert werden, die es noch gar nicht gibt? Die Wissenschaftler behelfen sich mit einem so genannten Prototyp-Vakzin: jeweils auf Basis des für den Menschen neuen Subtyps, der sich möglicherweise zu einem pandemischen Virus weiterentwickelt. Für H5N1 haben WHO-Labors anhand von Varianten, die für den Menschen infektiös sind, mehrere Prototyp-Impfstämme hergestellt. Diese stehen akademischen und industriellen Forschungseinrichtungen zur Verfügung, um daraus Prototyp-Impfstoffe zu entwickeln. Ein Impfstoff gegen H5N1 löste in einer klinischen Studie in den USA bei gesunden Versuchspersonen eine Immunantwort aus, die im Ernstfall schützen könnte.

Allerdings wäre die nötige Gesamtmenge an Antigen sechsmal so hoch wie für die Immunisierung gegen einen saisonalen Stamm. Ginge ein solcher Impfstoff in die Massenproduktion, stieße man sehr schnell an Grenzen: Die geschätzte bisherige Weltjahresproduktion von 300 Millionen Dosen eines saisonalen Vakzins mit drei Stämmen würde auf 150 Millionen Dosen eines Pandemie-Impfstoffs zusammenschmelzen – bei zwei Impfungen für einen vollen Immunschutz gegen den neuen Erreger ist das nicht einmal genug, um die gesamte deutsche Bevölkerung zu versorgen.

Mehrere Firmen arbeiten daran, den Impfstoff zu strecken. Helfen sollen dabei Adjuvantien – Beistoffe, die das Immunsystem zusätzlich stimulieren. Experten schätzen, dass sich mit solchen Strategien in absehbarer Zeit 1 bis 7 Milliarden Dosen produzieren lassen. Das Paul-Ehrlich-Institut, das Bundesamt für Sera und Impfstoffe, in Langen rechnet noch im Dezember 2005 mit einem Zulassungsantrag für einen entsprechenden Prototyp-Impfstoff. Bei positiver Beurteilung könnte er bis zum Frühjahr 2006 seine Zulassung für Europa erhalten.

Wer wird zuerst geimpft?

Das eigentliche Pandemie-Vakzin kann erst hergestellt werden, wenn der Ernstfall schon eingetreten ist. Es muss entsprechend auf das inzwischen weiter mutierte Pandemievirus zugeschnitten sein. Ein zugelassenes Prototyp-Vakzin stellt aber sicher, dass Impfstoffkonzept und Produktionsverfahren gegen den neuen Subtyp erprobt sind. Auf dieser Grundlage lässt sich durch geringe Veränderungen ein Pandemie-Impfstoff gewinnen, ähnlich wie das saisonale Vakzin jährlich den häufigsten zirkulierenden Varianten angepasst wird. Das Paul-Ehrlich-Institut geht davon aus, dass im Ernstfall – wenn alles glatt läuft – in vier bis sechs Monaten genügend zur Verfügung steht, um der gesamten deutschen Bevölkerung eine Injektion zu verabreichen. Sechs Wochen danach könnte ein zweites Mal geimpft werden.

Derzeitige Einschränkungen bestehen unter anderem in dem hohen Bedarf an bebrüteten Hühnereiern. Der finanzielle Aufwand, riesige Hühnerscharen zu halten, ist enorm. Als Ausweg bietet sich an, Viren in Zellkulturen zu vermehren (siehe auch Kasten rechts). Es wird damit gerechnet, dass mittelfristig solche Verfahren das Hühnerei zur Impfstoffproduktion ersetzen können.

Verzögerungen und Engpässe in der Versorgung mit einem Pandemie-Impfstoff dürften zumindest für die erste Seuchenwelle unvermeidlich sein. Deshalb ist eine Priorisierung der zu impfenden Gruppen nötig. Der nationale Pandemieplan empfiehlt: zuerst das Personal im medizinischen Versorgungsbereich, dann Berufsgruppen, die zur Aufrechterhaltung der öffentlichen Infrastruktur und Sicherheit beitragen. Das sind in Deutschland rund sieben Millionen Menschen. Weitere Bevorzugungen bestimmter Gruppen sollten nach vorher festgelegten Kriterien kurzfristig entschieden werden. In Frage kommen etwa Menschen mit schweren chronischen Erkrankungen.

Noch bis 1999 hatte die WHO eine einfache Definition, ab wann wir es überhaupt mit einer Grippepandemie zu tun haben – dann, wenn sich eine neue Virusform in mindestens einem Land gesichert zwischen Menschen verbreitet. Die blitzschnelle Ausbreitung in einem solchen Stadium noch zu stoppen, schien undenkbar – so der Stand von damals. Doch Verbesserungen in der Virusüberwachung und die Entwicklung wirksamerer antiviraler Medikamente haben zu einer veränderten Einstellung geführt. Nach Einschätzung der WHO gibt es nun an der Schwelle zur Pandemie ein schmales Zeitfenster, in dem sie noch abgefangen und begrenzt, im besten Fall sogar ausradiert werden kann.

Was der gesunde Menschenverstand nahe legt, bestätigen auch Computermodelle: Eindämmungsmaßnahmen müssten außerordentlich schnell und wirksam sein. Influenza verbreitet sich mit ungeheurer Geschwindigkeit, weil sie eine so kurze Inkubationszeit hat. In gerade ein-

mal zwei Tagen nach der Ansteckung kann der Infizierte die ersten Symptome zeigen und Viren verbreiten, die wiederum andere infizieren. Manche Menschen werden sogar 24 Stunden, bevor Symptome auftreten, schon infektiös.

Im Vergleich dazu verbreitet sich die Lungenseuche Sars langsam. Ihr Erreger, ein neues Coronavirus, das 2003 in China auftauchte, machte Infizierte im Durchschnitt nach fünf Tagen krank. Das gab dem Gesundheitspersonal Zeit, Personen, die mit den Kranken in Kontakt standen, aufzuspüren und zu isolieren, bevor sie andere anstecken konnten.

Solche Maßnahmen allein greifen bei Grippe nicht, so die Experten. Zwei Computersimulationen zeigen aber, wie wir doch eine Chance haben, eine potenzielle Pandemie im Keim zu ersticken: mit bis zu 30 Millionen Dosen antiviraler Medikamente und zusätzlich einem wenigstens partiell schützenden Impfstoff. Die übrigen Bedingungen müssten allerdings nahezu ideal sein. Neil M. Ferguson vom Imperial College in London modellierte die Verbreitung in einer 85-Millionen-Bevölkerung, basierend auf den demografischen und geografischen Verhältnissen von Thailand. Demnach hätte das Gesundheitspersonal nach der ersten Übertragung von Mensch zu Mensch maximal 30 Tage Zeit, um die neue Grippe zu besiegen. Dazu müssten aber, wo immer sie ausbricht, antivirale Medikamente zur Behandlung und zur Vorbeugung eingesetzt werden.

WHO-Verantwortliche bezweifeln, dass die Überwachung in Teilen Asiens verlässlich genug ist, um eine sich anbahnende Epidemie rechtzeitig zu erfassen. In der Praxis habe es meist mehr als 20 Tage gedauert, bis eine menschliche H5N1-Erkrankung bestätigt war, warnte Stöhr bei einem Expertentreffen in der US-Hauptstadt Washington im April 2005. Das ließe nur ein sehr schmales Zeitfenster übrig, um Medikamente in abgeschiedene Gegenden zu bringen und sie unter bis zu einer Millionen Menschen zu verteilen.

Zwei oder drei Wellen werden über den Globus rasen

Genießt die Bevölkerung bereits einen gewissen partiellen Immunschutz, so stünde etwas mehr Zeit zur Verfügung. Ira M. Longini junior von der Emory-Universität in Atlanta kommt mit seinen Modellierungen einer kleineren Gruppe mit thailändischer Demografie zu einem ähnlichen Ergebnis wie Ferguson. Er spielte aber auch Szenarien mit Vorimpfungen durch. Der fiktive Prototyp-Impfstoff bot dabei keinen vollständigen Schutz gegen den Pandemiestamm, vielmehr reduzierte er das Infektionsrisiko lediglich um 30 Prozent. Trotzdem: Dank der verringerten Anfälligkeit der Modellgruppe ließ sich selbst die Verbreitung eines hochinfektiösen Stamms noch eindämmen. Um das auch im wirklichen Leben umzusetzen, müssten die Regierungen der Industrienationen ihren H5N1-Impfstoff vorbeugend solchen Regionen der Welt zukommen lassen, wo das Virus am wahrscheinlichsten zum Pandemiestamm wird.

Aus dem Verbreitungsmuster vergangener Grippepandemien ist zu erwarten, dass ein einmal entfesselter neuer Erreger in zwei oder drei Wellen über den Globus rast. Für eine Umrundung würde er wohl mehrere Monate brauchen und vor Ort jeweils sechs bis acht Wochen wüten. Zwischen den einzelnen Wellen herrscht typischerweise wenige Monate Ruhe: Schlägt die erste im Frühling zu, so tritt die nächste eventuell im Spätsommer oder Frühherbst auf. Weil ein maßgeschneiderter Impfstoff frühestens in vier Monaten in nennenswerten Mengen zur Verfügung stünde, bereitet den Planern die erste Welle am meisten Kopfzerbrechen (siehe Kasten auf S. 78). ▷

Neue Impfstofftechnologien

Wissenschaftler testen Methoden, die mit weniger Impfmaterial auskommen, um mehr Menschen versorgen zu können. Sie arbeiten auch an Techniken, um den Prozess der Impfstoffherstellung zu beschleunigen.

Technik	Vorteile	Stand der Entwicklung	Firma
Intradermale Injektoren	Den Impfstoff in die Haut zu injizieren statt in den Muskel, könnte die Dosis pro Injektion auf ein Fünftel senken	Klinische Versuche sind viel versprechend, doch wenige Ärzte sind mit dem Verfahren vertraut	Iomai, GlaxoSmithKline
Adjuvantien	Chemische Zusätze verstärken die Immunantwort, sodass pro Injektion weniger Virusprotein benötigt wird	Erst ein Impfstoff ist in Europa zugelassen, andere sind in Entwicklung	Iomai, Chiron, GlaxoSmithKline
Impfstoff aus Zellkulturen	Vermehrung des Virus in Zellkultur statt im Hühnerei würde die Produktion beschleunigen	Chiron führt eine groß angelegte klinische Studie in Europa durch, Sanofi-Pasteur und Crucell entwickeln die Technik für die USA	Chiron, Baxter, Sanofi Pasteur, Crucell, Protein Sciences
DNA-Impfstoffe	Mit viraler DNA ummantelte Goldpartikel könnten mit Druckluft in die Haut injiziert werden. Impfstoffe gegen einen neuen Stamm ließen sich so innerhalb von Wochen produzieren und Jahre ohne Kühlung aufbewahren	Kein DNA-Impfstoff hat sich bisher als wirkungsvoll im Menschen erwiesen. PowderMed erwartet Ergebnisse aus einer Studie mit H5N1 Ende 2006	PowderMed, Vical
Universal-Impfstoff	Ein Impfstoff gegen ein virales Protein, das selten mutiert, wirkt vielleicht gegen jeden Influenzastamm. Vorhandene Vorräte ließen sich im Pandemiefall nutzen	Acambis startete mit der Entwicklung eines Impfstoffs gegen das M2e-Antigen im Sommer 2005	Acambis

▷ Hat eine Pandemie erst einmal ihren Siegeszug um den Globus angetreten, dürften die Gegenmaßnahmen lokal sehr unterschiedlich ausfallen. Die Entscheidungen werden ebenso auf politischen Schwerpunkten basieren wie auf der Bewertung wissenschaftlicher Erkenntnisse. Nicht zuletzt bestimmen die Ressourcen eines Landes, wie es der Pandemie begegnet. Nur reichen Ländern wird es möglich sein, einen Grundstock antiviraler Medikamente zur kurzfristigen Vorbeugung sowie zur Therapie im akuten Fall zu bevorraten.

Den meisten Ländern wird jedoch gar nichts anderes übrig bleiben, als sich erst einmal auf das zu verlassen, was die WHO nichtpharmazeutische Interventionen nennt. Deren Effizienz ist noch nicht eingehend untersucht. Bei welchen in Frage kommenden Maßnahmen kann man sich aber wenigstens auf medizinische Evidenzen stützen? Die WHO hatte dazu bereits im März 2004 Grippespezialisten einberufen, die versuchen sollten, die geeigneten Interventionen zu bestimmen. Reisende etwa beim Betreten eines Landes auf Grippesymptome zu untersuchen, bringt »keinen erwiesenen Vorteil für die Gesundheit«, schloss die Gruppe. Sie räumte ein, dass einige Länder trotzdem zu diesem Mittel greifen dürften, allein um ihre Bevölkerung zu beruhigen.

Auch ein Fieber-Screening an Flughäfen, das einige asiatische Länder bei der Sars-Epidemie praktizierten, beurteilten sie skeptisch, ebenso Vorschläge, Fieberhotlines und -kliniken einzurichten. Stattdessen empfehlen sie Gesichtsmasken für Erkrankte und deren Pflegepersonal. Für Gesunde biete Händewaschen einen wirksameren Schutz als Gesichtsmasken in der Öffentlichkeit. Anstecken könnten sie sich nämlich ebenso gut zu Hause und bei der Arbeit, auch durch das Berühren kontaminierter Oberflächen inklusive der Gesichtsmaske, die sie eigentlich schützen sollte.

Hundert Millionen Opfer?

Verbote öffentlicher Versammlungen oder des Massenverkehrs seien vom Verlauf der Pandemie abhängig zu machen. Wenn wie beispielsweise im Jahr 1957 und 1968 Kinder durch das Virus besonders gefährdet oder auch nur eine wichtige Quelle der Verbreitung wären, könnten Maßnahmen wie die Schließung von Schulen durchaus sinnvoll sein.

Wenn wirklich zwei Milliarden Menschen erkranken, werden 10 Millionen sterben? Oder gar 100 Millionen? Weltweit versuchen Gesundheitsexperten, die Zahl der Opfer einer künftigen Pandemie abzuschätzen. Voraussagen sind deshalb so problematisch, weil niemand jetzt schon weiß, ob die nächste Pandemie so mild ausfallen wird wie die von 1968, von der mancher Grippeforscher etwas respektlos als »Kümmerling« redet. Genauso gut kann sie sich als eiskalter Killer wie die große Influenza von 1918 entpuppen.

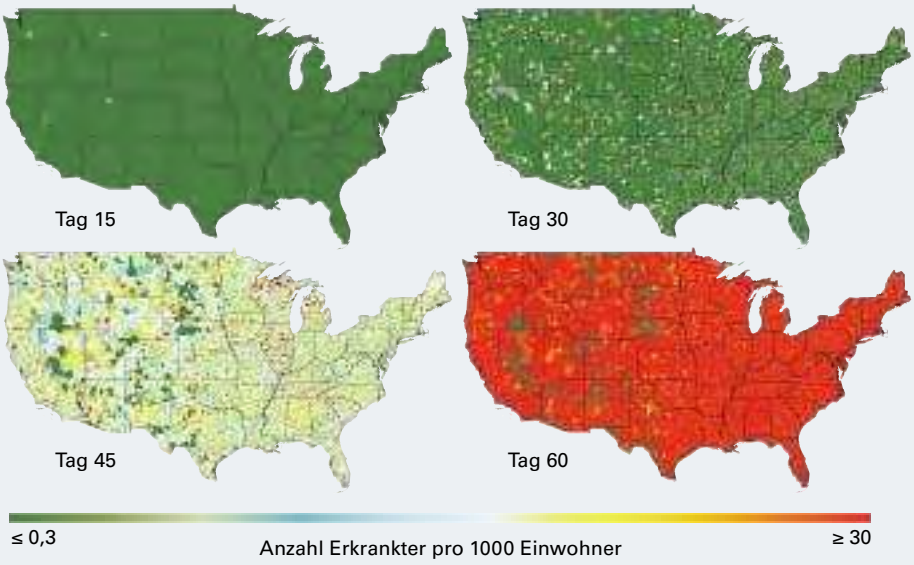
Bislang bleibt nur eine grobe Daumenpeilung. Für Deutschland entwirft das Robert Koch-Institut dabei folgende Szenarien: Wenn der Erreger so neuartig ist, dass keine Immunität in der Bevölkerung besteht, dürfte sich jeder Zweite anstecken, und von dieser Gruppe würden bei einem milden Verlauf 15 Prozent erkranken. Ohne Therapie und Prophylaxe ist dann in Deutschland mit 6 Millionen zusätzlichen Arztbesuchen zu rechnen, mit 180 000 Krankenhauseinweisungen und 48 000 influenzabedingten Todesfällen. Bei einer sehr hohen Virulenz, sprich Gefährlichkeit, sind 50 Prozent erkrankte Infizierte, 21 Millionen zusätzliche Arztbesuche und bis zu 160 000 Tote möglich. Eine rechtzeitige Behandlung mit Medikamenten könnte wohl die Hälfte davon retten. Zum Vergleich: Der jährlichen Grippe erliegen durchschnittlich etwa 10 000 Bundesbürger. Als Grundlage für Planungen dient eine mittlere Virulenz mit 30 Prozent erkrankten Infizierten.

Die Ärzte und Schwestern, die an vorderster Front kämpfen, interessiert vor allem, wie viele Patienten mit welchen Beschwerden zu versorgen sind. Das hingegen dürfte sowohl von den Eigenschaften des Virus als auch von der Empfindlichkeit verschiedener Personengruppen abhängen. Eine milde Pandemie beispielsweise könnte einer saisonalen Grippe ähneln – jedoch mit einer viel höheren Zahl Infizierter.

In der Regel trifft die jährliche Grippe am stärksten Personen, die an schweren chronischen Erkrankungen leiden. Besonders gefährdet sind auch Kleinkin-

Ausbreitung einer Influenzapandemie in den USA

Eine Simulation von Forschern des Nationallabors in Los Alamos und der Emory-Universität in Atlanta veranschaulicht, wie sich eine erste pandemische Welle in den USA ausbreiten würde, wenn weder Impfstoffe noch Medikamente zur Verfügung stünden. Bei 40 Infizierten am ersten Tag wäre der Höhepunkt innerhalb von 60 Tagen erreicht und die Welle nach vier Monaten abgeklungen. Ein Drittel der US-Bevölkerung würde dabei an Influenza erkranken. Simulationen mit weiteren Bedingungen helfen, die besten Maßnahmen zum Eindämmen einer Pandemie zu ermitteln.



LOS ALAMOS NATIONAL LAB., TIMOTHY GERMANN, KAI KADAU & CATHERINE MACKEN; EMORY UNIVERSITY, IRA LONGINI (MODELS OF INFECTIOUS DISEASE AGENT STUDY, NATIONAL INSTITUT OF GENERAL SCIENCES)

der, Ältere und Menschen mit einem geschwächten Immunsystem. Die Haupttodesursache bei Grippe ist Lungenentzündung. Diese kann durch das Virus selbst, häufig aber auch sekundär durch Bakterien verursacht werden, welche die geschwächte Abwehr überrennen. Forscher der niederländischen Gesundheitsbehörde haben anhand von Modellierungen einer Pandemie mit ähnlichen Eigenschaften gezeigt, dass sich Krankenhausaufenthalte um rund ein Drittel verringern ließen, wenn die üblichen Risikogruppen im Vorfeld gegen bakterielle Lungenentzündung geimpft würden.

Im Gegensatz dazu wütete der Killerstamm von 1918 am heftigsten in der Gruppe der ansonsten gesunden 20- bis 40-Jährigen, teils gerade weil ihr Immunsystem so kräftig war. Wissenschaftler haben herausgefunden, dass dieser Stamm zum einen eine frühe Immunantwort unterdrückt. Zu ihr gehört die Freisetzung von Interferon: Die Substanz hilft Zellen, sich viralen Angriffen zu widersetzen. Zum anderen aber provoziert das Virus eine extreme Überreaktion der Immunzellen, die massenhaft Cytokine abgeben. Diese Botenstoffe des Immunsystems veranlassen Abwehrzellen zu einem gewaltigen Sturmangriff auf das Lungengewebe.

Nichts an H5N1 in seiner gegenwärtigen Form lässt hoffen, dass wir bei einer Pandemie glimpflich davonkommen. Das meint zumindest Frederick G. Hayden, Virologe an der Universität von Virginia in Charlottesville, der die WHO bei der Behandlung von Opfern der Vogelgrippe berät. »Wenn das Virus seine Pathogenität nicht dramatisch verändert«, versichert er, »werden wir es mit einem hochgefährlichen Stamm zu tun haben.« Viele H5N1-Opfer litten an einer akuten Lungenentzündung, die das Virus selber tief in den unteren Lappen des Organs verursacht hat. In einigen Fällen wiesen Bluttests auf eine außergewöhnliche Cytokin-Aktivität hin. Zudem kann das Virus auch andere Körperbereiche befallen. Bei einigen Patienten vermehrte es sich offensichtlich im Darm und rief dort schweren Durchfall hervor. Bei zwei vietnamesischen Kindern hat der Erreger möglicherweise das Gehirn infiziert. Die beiden starben an einer Enzephalitis ohne jegliches Anzeichen einer Atemwegserkrankung.

Antivirale Medikamente eignen sich am besten, um das Virus direkt zu bekämpfen. Aber viele H5N1-Patienten kamen zu spät, so konnten die Ärzte mit den Mitteln nicht mehr viel ausrichten. Die Variante des Stamms, welche die meisten menschlichen Opfer gefordert hat, erwies sich als resistent gegen eine Klasse älterer antiviraler Wirkstoffe, den Amantadinen. Möglicherweise sind solche Resistenzen entstanden, weil diese Arzneistoffe in Teilen Asiens in der Geflügelzucht verwendet wurden. H5N1 spricht im Laborexperiment immer noch auf neuere antivirale Medikamente an, die so genannten Neuraminidasehemmer. Derzeit sind mit Oseltamivir (Handelsname Tamiflu) und Zanamivir (Relenza) zwei Produkte auf dem Markt. Tamiflu wird als Pille geschluckt, Relenza hingegen als Pulver inhaliert. Um gegen eine saisonale Grippe zu wirken, muss die Therapie spätestens 48 Stunden nach den ersten Symptomen einsetzen.

Formal sind beide Wirkstoffe gegen eine H5N1-Infektion bis jetzt lediglich im Tierversuch erprobt worden. Wie Robert G. Webster vom St. Jude Children's Research Hospital in Memphis (Tennessee) im Juli 2005 berichtete, reichte eine normale therapeutische Tamiflu-Dosis aus, um infizierte Mäuse schließlich von dem Virus zu befreien. Die Menge an Wirkstoff – beim Menschen zwei Tabletten täglich – wurde dabei natürlich an das Körpergewicht der Tiere angepasst. Doch waren zur Behandlung acht statt der sonst fünf Tage wie bei einer herkömmlichen Grippe nötig.

Nach den ersten Erfahrungen wirkt Tamiflu auch bei H5N1-Infektionen im Menschen, vorausgesetzt die Therapie setzt rechtzeitig ein. Auch ein vietnamesisches Mädchen wurde geheilt, obwohl sich in ihrem Blut genetische Varianten befanden, die sich nachträglich im Reagenzglastest als resistent gegen Tamiflu erwiesen. Die Experimente ergaben allerdings, dass der Erreger sich seine Resistenz mit einer geringeren Vermehrungsrate erkauft hatte. Der Fall zeigt, wie wichtig eine sorgfältige Diagnose für die Verschreibung des Medikaments ist. Die Ärzte hatten dem Mädchen zunächst eine niedrigere Dosis zur Vorbeugung verschrieben – zu einem Zeitpunkt, als es bereits deutliche Symptome einer Erkrankung zeigte. Wie man weiß, bietet eine zu geringe Dosierung den Erregern gute Chancen, resistent zu werden.

Zu geringe Mindestvorräte an Medikamenten

Die wachsende Sorge vor einer Pandemie hat die Nachfrage nach Tamiflu sprunghaft steigen lassen. Daher will das Pharmaunternehmen Roche die Jahresproduktion bis zum Jahr 2007 auf 300 Millionen Behandlungseinheiten hochfahren – zehnmal so viel wie noch Anfang 2004. Dies würde im Ernstfall gerade mal für 5 Prozent der Weltbevölkerung ausreichen. Mittelfristig könnten weitere Firmen einspringen, die den Wirkstoff in Lizenz produzieren. Roche führt derzeit Verhandlungen mit zahlreichen Unternehmen. Der WHO hat der Konzern 3 Millionen Behandlungseinheiten zugesagt, als Ersthilfe.

Für Deutschland empfiehlt das RKI, zunächst einen Mindestvorrat anzulegen. Vorrang hat auch hier das medizinische Personal, Beschäftigte im Bereich der öffentlichen Sicherheit und Ordnung und ▷

Neue Wirkstoffe gegen Influenza

Gängige Medikamente richten sich gegen Oberflächenproteine des Virus. Die Klasse der Amantadine setzt am Molekül M2 an, während Zanamivir und Oseltamivir die Neuraminidase hemmen. In der Entwicklung sind verbesserte Neuraminidasehemmer. Neue Ansätze zielen darauf, dem Virus den Eintritt in die Zelle zu verwehren oder seine weitere Vermehrung zu unterbinden.

Ansatz	Wirkstoff (Hersteller)	Vorteil	Stand der Entwicklung
Hemmung der Neuraminidase; das Virus benutzt das Enzym, um sich von einer Zelle zu lösen und zur nächsten vorzuarbeiten	Peramivir (BioCryst Pharmaceuticals); CS-8958 (Biota / Sankyo)	Neuraminidase-Inhibitoren haben geringere Nebenwirkungen und provozieren seltener virale Resistenzen als die älteren Amantadine. CS-8958 ist eine Formulierung, die bis zu einer Woche in der Lunge wirksam bleibt	Nach klinischen Versuchen erreicht eingenommenes Peramivir die Lungen nur schlecht, klinische Studien einer intravenösen Formulierung werden 2006 erwartet; Studien zur Sicherheit sind für CS-8958 abgeschlossen
Hemmung der Bindung des Virus an die Zelle	Fludase (NexBio)	Der Wirkstoff blockiert den Sialinsäure-Rezeptor, mit dem das Virus an der Zelle andockt; Fludase sollte gegen alle Grippestämme gleich wirksam sein	klinische Studien für 2006 geplant
Stimulierung der RNA-Interferenz	G00101 (Galenea); noch ohne Namen (Alnylam Pharmaceuticals)	Verwendet DNA, um einen speziellen Verteidigungsmechanismus in der Zelle zu aktivieren; kennzeichnet virale Nukleinsäuren als zu zerstörendes Ziel. G001498 hat sich im Tierversuch als wirkungsvoll gegen H5- und H7-Vogelgrippeviren erwiesen	klinische Versuche in den nächsten 18 Monaten erwartet
Antisense-DNA zur Blockade viraler Gene	Neugene (AVI BioPharma)	Synthetische DNA-Stränge binden sich an virale RNA, die normalerweise der Wirtszelle den Befehl erteilt, das Virus zu vervielfältigen. Diese Strategie sollte gegen die meisten Stämme wirksam sein	Tierversuche sind für 2006 geplant

▷ besondere Risikogruppen – insgesamt mindestens 17 Millionen Menschen. Die derzeitigen Vorräte in den einzelnen Bundesländern decken gerade einmal den Bedarf für etwa die Hälfte – bei Weitem zu wenig für eine therapeutische Versorgung aller.

An eine Prophylaxe ist unter diesen Umständen gar nicht zu denken. Bernhard R. Ruf, Chefarzt am Städtischen Klinikum St. Georg in Leipzig, der an dem Pandemieplan mitgewirkt hat, moniert Versäumnisse. »Die einzelnen Bundesländer sollten jetzt alles daransetzen, Medikamente in ausreichender Menge zu bevorraten.«

Hayden hofft, dass mit Peramivir in absehbarer Zeit noch ein dritter Wirkstoff zur Verfügung steht, bevor eine neue Pandemie zuschlägt. Das Mittel soll für die intravenöse Behandlung bei hospitalisierten Grippepatienten zugelassen werden. Dieser Neuraminidasehemmer zeichnet sich durch eine lange Verweildauer im Körper aus. Eine einmalige Dosis würde zur Therapie ausreichen oder aber als Prophylaxe einen einwöchigen Schutz bieten. Dieser und andere Wirkstoffe müssen alle erst noch die klinischen Prüfungen bestehen, bevor wir auf sie zählen können (siehe Kasten oben). Wissenschaftler arbeiten zudem daran, die Immunantwort gegen das Virus positiv zu beeinflussen. Je mehr Optionen, desto besser können wir einer gefährlichen Pandemie die Stirn bieten.

Nie zuvor war die Welt in der Lage, eine Grippepandemie am Horizont auftauchen zu sehen und die Evolution eines potenziell pandemischen Virus wissenschaftlich zu verfolgen. Noch nie zuvor hatte sie so viele mögliche Mittel und Wege in der Hinterhand, um im Ernstfall den Schaden gering zu halten. Selbst wenn das gefürchtete H5N1 niemals zu einer Variante mutiert, die leicht von Mensch zu Mensch springt, ist doch eines gewiss: Irgendeines der so wandlungsfähigen Influenzaviren wird es einmal schaffen und eine Pandemie auslösen. Besser, sie trifft uns vorbereitet. ◁

W. Wayt Gibbs (oben) ist Journalist, **Christine Soares** Redakteurin bei Scientific American. **Achim G. Schneider** (unten) ist promovierter Biologe und freier Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Die siegreiche Strategie des Grippevirus. Von E. J. Walker und R. G. Webster in: Spektrum der Wissenschaft, S. 48, August 2003

Entwaffnung von Grippeviren. Von W. G. Laver et al. in: Spektrum der Wissenschaft, S. 70, März 1999

Race is on for flu vaccine. Von Meredith Wadman in: Nature, Bd. 438, Heft 7064, S. 23, 3. November 2005

The Great Influenza. Überarbeitete Auflage. Von J. M. Barry. Penguin Books, 2005

John R. LaMontagne Memorial Symposium on Pandemic Influenza Research: Meeting Proceedings. Institute of Medicine. National Academic Press, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

1956

Radar-Autobremse

»Es wird in Zukunft keine Autozusammenstösse mehr geben, weil die Radar-Autobremse bei allen Hindernissen den Wagen automatisch stoppt. Der Radarschirm ist mehrere Zentimeter hoch und in der ganzen Breite des Wagens vor dem Kühler angebracht. Er strahlt einen Impuls aus. Ein ähnlicher Schirm ist für das Rückwärtsfahren am Heck befestigt. Je schneller der Wagen nun fährt, desto weiter wirkt der Radarstrahl.« *Neuheiten und Erfindungen, 23. Jg., Nr. 256, S. 14, Januar/Februar 1956*

Vaterschaft nach Augenschein

»Dr. H. Fleischhacker vom Universitäts-Institut für Vererbungswissenschaft, Frankfurt a. M., hat kürzlich darauf hingewiesen, daß in der Praxis der erbbiologischen Vaterschaftsgutachten nicht nur Altersveränderungen des Haares berücksichtigt werden müssen, sondern auch diejenigen der Augenfarbe. Bei neueren Untersuchungen von Erna Böshaar hat es sich herausgestellt, daß ein großer Teil heller Augen nachdunkelt (etwa 38 %). Man hat die Augenfarbe von Erwachsenen, die 1936 als Schulkinder untersucht worden waren, im Vorjahre erneut nachgeprüft. Augen, die 1936 eindeutig als hellblau deklariert wurden, sind inzwischen dunkelblau, grau, graublau, grünlich oder hell-mischfarbig geworden.« *Kosmos, 52. Jg., Nr. 1, S. 9, Januar 1956*

Kohle schaufeln mit Riesenbagger

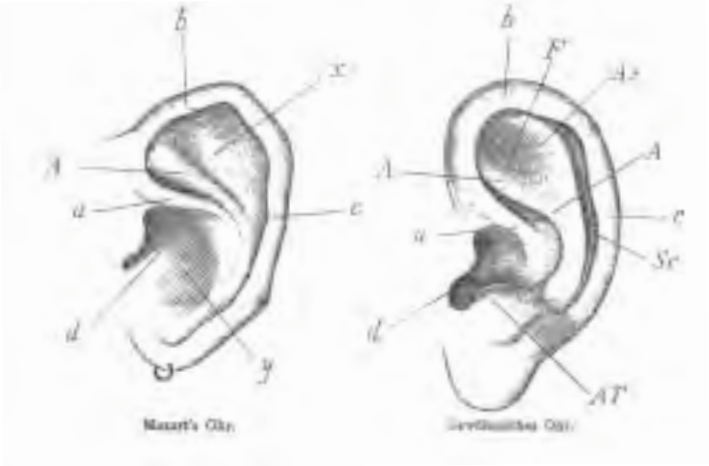
»Im rheinischen Braunkohlenbergbau wurde nach 1½ jähriger Montage ein Schaufelradbagger von bisher ungewohnten Ausmaßen in Betrieb genommen. Der Durchmesser des Schaufelrades beträgt 16 m. Auf seinem Umfang sitzen 12 becherförmige Schaufeln mit auswechselbaren Zähnen und einem Fassungsvermögen von je 3,6 m^3 … Bei einer durchschnittlichen Förderleistung von 100 000 m^3/Tag bewältigt der Mammutbagger Massen, zu deren Beförderung sonst 20 000 Arbeiter täglich notwendig wären … Bagger und Verladeanlage werden von nur 5 bis 6 Mann (einschließlich der Maschinenwärter) bedient.« *Umschau, 56. Jg., Nr. 2, S. 59, Januar 1956*

▲ Das riesige Schaufelrad bewältigt so viel Masse wie 20 000 Arbeiter.

1906

Mit missgebildetem Ohr zum Musikgenie

»Schon dem Laien wird die sonderbare Gestalt von Mozart's Ohr auffallen. Die äusserste Begrenzung des Ohres, der Ohrrand (bc), der für gewöhnlich in einer schön geschwungenen Bogenlinie verläuft, deren auf- und absteigender Teil ein untrennbares Ganze bildet, ist nämlich bei Mozart's Ohr mehrfach stumpfwinklig geknickt. Von all den charakteristischen Leisten (A, A_2, AT) in der Ohrmuschel ist bei ihm fast nichts vorhanden. Die hohle Ohrmuschel stellt nur eine glatte, fast gar nicht weiter modellierte Ebene dar, die der Muschel ein dürftiges, charakterloses Aussehen gibt ... Eine eigentümliche Ironie des Schicksals hat dem Manne, dessen innerliches Ohr sozusagen die höchste menschliche Entwickelung erreicht hat, ein zurückgebliebenes und missgebildetes äusseres Ohr gegeben.« *Umschau, 10. Jg., Nr. 5, S. 97, Januar 1906*



Per Auto zum Südpol

»Einen kühnen, eigenartigen Plan hat der belgische Forschungsreisende Henrik Arctowski gefasst. Er plant eine Reise im Motorwagen nach dem Südpol. Sein Wagen soll Räder haben, die etwa einen Fuss breit sind und mit Leder beschient und mit weit hervorstehenden Nägeln beschlagen werden, damit sie in dem hartgefrorenen Schnee Halt haben. Aehnlich, wie bei den Schlitten in Kanada, soll der Wagen unten eine Art geschwungene Laufschiene erhalten … Gleichviel, wie diese neue Südpol-Automobilexpedition auslaufen mag, in jedem Falle darf man von ihr eine reiche Ausbeute in geographisch-astronomischer und physikalischer Hinsicht erwarten.« *Allgemeine Automobil-Zeitung, 7. Jg., Nr. 1, S. 63, Januar 1906*

Quecksilbersalbe gegen Syphilis

»Einem großen Erfolg der Heilwissenschaft scheinen die Arbeiten der Prof. Roux und Metschnikoff zuzustreben. Ihre Versuche an Affen zur Präservation der Lustseuche bestätigen immer mehr, daß die Anwendung von Quecksilbersalben vor Ansteckung schützt. Der von Schaudinn entdeckte Virus der Syphilis wurde wiederholt Schimpansen eingeimpft und die Wundstelle nachher mit Kalomelsalbe (Quecksilberchlorür 10, Lanolin 20) eingerieben; die Tiere erkrankten nicht … Da die äußerliche Anwendung … ganz ungefährlich zu sein scheint, dürfte die Salbe in allen Fällen, wo nur ein Zweifel möglich ist, … zu empfehlen sein.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 13, S. 104, Januar 1906*

Ein Putzroboter für die Mama

Schon Sechst- und Siebtklässler können sich für die Technik des Alltags begeistern, wie die rege Beteiligung an dem Schülerwettbewerb »Faszination Technik« zeigt.

wis
wissenschaft in die schulen!

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz **»Spektrum der Wissenschaft«** oder **»Sterne und Weltraum«** kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.
www.wissenschaft-schulen.de

Von Stephanie Hügler

Pass auf, dass du nicht drauftrittst!« Die Ermahnung einer Mutter an ihren Sprössling müssen sich die Erwachsenen ebenfalls zu Herzen nehmen. Nur zu leicht könnte man eines der liebevoll gebauten und bemalten Objekte – Flugzeuge, Spaceshuttles, Schiffe, Autos, Windräder, komplette Urlaubslandschaften – zerstören.

Der ganze Raum ist erfüllt von Kindergeschnatter. Die einen lachen, die anderen kabbeln sich, gespannte Aufregung herrscht unter den Sechst- und Siebtklässlern. Alle Teilnehmer des rheinland-pfälzischen Schülerwettbewerbs »Faszination Technik« sind zur Preisverleihung im Technik Museum Speyer gekommen, mit ihren Eltern, ihren Lehrern, teilweise offenbar mit der ganzen Schulklasse. »Das ist ja gerade der Trick«, verrät Gerd Weyrauther, Leiter der hessisch-rheinland-pfälzischen Geschäftsstelle des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI). »Wenn die schon wissen, wer ausgewählt ist, kommen die anderen nicht mehr.«

Ziel des Wettbewerbs ist es, Kinder bereits im frühen Alter für Wissenschaft und Technik zu begeistern. Gunter Schaumann, emeritierter Professor an der Fachhochschule Bingen und Landesvertreter des VDI in Rheinland-Pfalz, hat den Wettbewerb ins Leben gerufen. Träger sind der VDI und das rheinland-pfälzische Ministerium für Bildung, Frauen und Jugend. Insgesamt 300 Schülerinnen und Schüler haben in diesem Jahr mitgemacht, etwas weniger als im Vorjahr. Dafür sind auffällig viele Modelle eingegangen gegenüber den ebenfalls angenommenen Zeichnungen und Textbeiträgen. Für den VDI ist dies ein gutes Zeichen: Offenbar können sich bereits Elf- bis Dreizehnjährige für handwerkliche und technische Arbeiten erwärmen.

Unter Anleitung der Lehrer haben die Kinder in ihren Klassen eifrig gebastelt. Dabei haben sie so viele kreative Ideen in die Tat umgesetzt, dass die Juroren manche Preise mehrfach vergaben.

So erhielten die beiden Elfjährigen Tim Lamneck und Christian Matthei aus Mülheim-Kärlich einen 3. Preis für ihre beiden ungewöhnlichen Elektroschalter: Ein Löffel, der wie eine Wippe auf einem Holzbrett befestigt ist, wird auf der einen Seite mit einem Päckchen Nägel beschwert, sodass sich der Stiel hebt und den Stromkreis schließt. Beim anderen Schalter hebt Wasser, das in ein Glas geschüttet wird, ein Stück Styropor; eine daran befestigte Metallstange schließt den Stromkreis.

Entsalzungsanlage mit Esbit

Nur die krakelige Kinderschrift auf dem Erläuterungsblatt lässt erkennen, dass Phillip Bungert aus Gusenburg erst zwölf Jahre alt ist: Seine Meerwasserentsalzungsanlage im Miniaturformat, die ebenfalls einen 3. Preis errang, wirkt ziemlich ausgereift. Das Salzwasser wird in ein horizontales Kupferrohr gefüllt und von unten mit Esbit beheizt. Das Wasser verdampft, kondensiert an Blechen, die beiderseits an den Rohrenden angebracht sind, und tropft in darunter aufgestellte Getränkebecher; das Salz bleibt im Rohr zurück.

Etwa 70 Prozent der Teilnehmer sind Mädchen. Sie stellen immerhin elf der insgesamt neunzehn Preisträger, sehr zur Freude von Bildungsministerin Doris Ahnen. Auch unter den Trägern des 2. Preises sind drei Mädchen: Muriel Müller aus Flacht und Lisa Bühler aus Holzheim mit dem funktionsfähigen Modell einer oberschlächtigen (von oben angetriebenen) Wassermühle sowie Isabell Rausch aus Beuren mit ihrem druckluftgetriebenen Dreirad (Bild oben rechts): Der Luftstrahl aus einem aufgeblasenen Luftballon wird durch ein Rohr auf das als Schaufelrad ausgebildete Vorderrad gelenkt. Isabells Mitschüler

Robin Arnoldi (links) aus Veldenz und Andreas Hoffmann aus Bernkastel-Kues erhielten für ihren Laufroboter den 1. Preis.

FOTOS DIESER DOPPELSEITE: STEFAN OLDENBURG

Der dreirädrige Wagen mit Luftballonantrieb von Isabell Rausch wurde mit einem 2. Preis ausgezeichnet.

Florian Zillessen erhielt für sein Flugzeugmodell mit Solarantrieb ebenfalls einen 2. Preis.

Den Vogel schossen Andreas Hoffmann (11) und Robin Arnoldi (12) ab: Aus schwarz-roten Fischertechnikteilen und einem Elektromotor hatten die beiden einen Laufroboter konstruiert, der immerhin drei Schritte vor und wieder zurück gehen kann. Das war der Jury aus Lehrern und Mitgliedern des VDI den 1. Preis wert. Die beiden Jungen, die auf dem Gruppenbild noch sehr lebhaft und keck aussehen, sind beim Interview ein bisschen verlegen. Ihr Lehrer hat ihnen die Teilnahme am Wettbewerb vorgeschlagen, und sie sind zum ersten Mal dabei. Wie sie auf die Idee mit dem Roboter gekommen sind? Das wissen sie nicht genau, doch Robins Vater mischt sich ein: »Du wolltest doch immer einen Putzroboter für die Mama bauen.«

Das ist für die Bildungsministerin ein gutes Beispiel für die Motivation der kleinen Ingenieure. Warum wohl so viele Beiträge rund um die maschinellen Heinzelmännchen eingegangen seien? Weil im täglichen Leben jeder sehe, wie viele Arbeiten er nicht gerne erledige. Da sei es nur logisch, dass man sich dafür einen Roboter wünsche.

Dasselbe hat sich offenbar auch Sarah Steinbach aus Perl gedacht. Ihr preisgekröntes Bild »zeigt, was eine Mutter alles machen muss. Hier sieht man, wie die Kinder sich deshalb beschweren, und hier helfen die Roboter, damit die Mutter mehr Zeit hat«, erläutert die kleine Künstlerin ihre Darstellung.

Genau auf die Begeisterung fürs Praktische kommt es der Ministerin und den Juroren an. Keiner erwarte von den Kleinen bedeutende wissenschaftliche Leistungen. Doch wenn der Funke der Begeisterung für Wissenschaft und Technik spürbar werde, dann hätten die Organisatoren ihr Ziel erreicht.

Jocelyne Landeau-Constantin, Chefin der Kommunikationsabteilung beim Darmstädter Kontrollzentrum der Europäischen Raumfahrt-Agentur Esa, stößt in das gleiche Horn: »Ich habe zwei Söhne in diesem Alter, die regelmäßig mein Wohnzimmer mit solchen Modellen bepflastern«, erzählt sie mit einem Augenzwinkern. »Zunächst ärgere ich mich immer ein bisschen, aber dann freue ich mich, denn ich denke mir: Vielleicht sind das die Ingenieure von morgen.« ◁

»Vielleicht Archäologin«

Die 11-jährige Antonia Porz aus Nackenheim hat das Prinzip der elektrischen Klingel mit einer Nagelfeile, einer Büroklammer und einer Coladose realisiert: Ein Elektromagnet zieht die Nagelfeile an und unterbricht dadurch seinen eigenen Stromkreis. Die Nagelfeile schwingt zurück, schlägt auf die Coladose, schließt dadurch den Stromkreis wieder und so weiter. Indem sie in rascher Folge gegen die Dose klackert, entsteht ein Summton.

Nach der Preisverleihung antwortet Antonia mit ihrer kecken blauen Stoffmütze ein bisschen schüchtern, aber durchaus aufgeweckt auf meine Fragen. Sie macht zum ersten Mal mit. Eigentlich wollte sie zuerst eine Brücke bauen, berichtet sie etwas verschämt, doch die Zeit habe nicht mehr gereicht, und so habe sie sich für den Summer entschieden. Ob sie sich vorstellen kann, als Wissenschaftlerin oder Ingenieurin ihre Bastelfähigkeiten einmal zum Beruf zu machen? Da ist sich Antonia nicht sicher. Aber vielleicht möchte sie einmal Archäologin werden. Auf die Frage, ob ihre Eltern oder sie selbst stolz auf ihren 3. Preis sind, zuckt sie verlegen mit den Achseln; nur ihre wachen, blitzenden Augen geben eine klare Auskunft.

Stephanie Hügler arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

AUTORIN

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Der Schülerwettbewerb »Faszination Technik«

Ziel des Wettbewerbs ist es, junge Tüftler schon früh für Technik zu begeistern, ihre Fantasie anzuregen und sie zu ungewöhnlichen Ideen zu inspirieren. Der Wettbewerb wird jedes Jahr in den Bundesländern Rheinland-Pfalz (für Sechst- und Siebtklässler) und Hessen (für Siebt- und Achtklässler) ausgeschrieben. Träger sind der Verband Deutscher Ingenieure (VDI) und das jeweilige Bildungs- beziehungsweise Kultusministerium. Einreichen können die Schülerinnen und Schüler

- Textbeiträge: Interviews, Geschichten oder Gedichte;
- Bilder: Zeichnungen, Collagen, Computergrafiken, Fotos;
- Werkmodelle aller Art.

Preise für den diesjährigen rheinland-pfälzischen Wettbewerb haben unter anderem die European Space Agency (Esa), das Technik Museum Speyer sowie die Firmen Opel und Lego gestiftet, darunter einen Rundflug in einem Kleinflugzeug sowie Besuche bei der Esa in Darmstadt und beim Frankfurter Flughafen. Ein Sonderpreis des Ministeriums ging an die erfolgreichste Schule.

Für das nächste Jahr ist wieder ein Wettbewerb »Faszination Technik« geplant. Nähere Informationen für Rheinland-Pfalz unter www.vdi.de/vdi/vvo/l_vertretungen/rh_pfalz/aktuell/08962/index.php, für Hessen unter www.vdi.de/vdi/vvo/l_vertretungen/hessen/aktuell/08954/index.php.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Lawinenschutz aus dem All?

Bei instabiler Schneedecke genügt ein Skifahrer, um eine Katastrophe auszulösen. Satellitentechnik soll künftig helfen, Risikozonen aufzuspüren.

Von Sergio Pistoi

Es ist ein klarer Maimorgen auf Spitzbergen. Die Temperatur liegt bei 12 Grad unter null. »Ein außergewöhnlich warmer Tag«, urteilen die Bewohner der italienischen Forschungsstation »Dirigibile Italia« in der Ortschaft Ny Ålesund. Bestens gestimmt machen sie sich bereit, die Basis zu verlassen.

Ihre gute Laune ist verständlich. Schließlich befinden wir uns auf dem 79. Breitengrad. Von der polaren Eiskappe trennt uns nur ein Meeresarm, und vom Nordpol sind wir weniger als eine halbe Flugstunde entfernt. Selbst in der wärmsten Jahreszeit kann hier das Thermometer ohne Vorwarnung auf unter –40 Grad Celsius fallen.

In zwei Monaten werden Eis und Schnee in der Umgebung der Station geschmolzen sein. Dann tritt der nur von einer dünnen Schicht Grün bedeckte Permafrostboden zu Tage. Doch davon ist jetzt nichts zu sehen: Bis zum Horizont mit der prachtvollen Gebirgssilhouette Spitzbergens erstreckt sich rundum nichts als blendendes Weiß.

Mauro Valt, Schnee-Experte am Lawinenzentrum von Arraba in der Provinz Trient, hat eine Schaufel aus der Station mitgenommen und hebt damit nun in der Nähe einen tiefen Graben aus. Schon nach wenigen Minuten ist er bis zum Kragen in der Rinne verschwunden und beginnt Schneeproben abzukratzen, deren Kristalle er mit einer Lupe untersucht. Was er hier macht, unterscheidet sich nicht sehr von seiner täglichen Arbeit in den Alpen. In der Wintersaison heben die Techniker der Lawinenzentren dort jeden Tag Dutzende solcher Gräben aus, um einen Querschnitt der Schneedecke zu erhalten und die verschiedenen Schichten in Augenschein zu nehmen.

IN KÜRZE

- Jedes Jahr gegen Ende des Winters, wenn der **Zusammenhalt der Schneedecke** nachlässt, verursachen Lawinen in der Alpenregion Todesfälle und Sachschäden.
- Die Lawinengefahr hängt von zahlreichen Faktoren ab. Eine große Rolle spielt dabei der **Typ von Eiskristallen,** die sich aus dem Schnee bilden, und die Art ihres Zusammenhalts.
- Der Vergleich von Satellitendaten mit Untersuchungen am Boden hat gezeigt, dass das Reflexionsspektrum der Schneedecke Rückschlüsse auf den Kristalltyp und Parameter wie Dichte, Feuchtigkeit und Luftgehalt erlaubt. Damit könnte man aus dem All **Risikobereiche identifizieren** und sich bei der mühsamen Aufnahme von Profilen am Boden auf diese Zonen konzentrieren.

Der weiße Killer

Auf den ebenen Flächen in der Umgebung von Ny Ålesund drohen natürlich keine Lawinen – eher wird man Opfer des extremen, unberechenbaren Klimas oder der Begegnung mit einem Eisbären. Aber die Forscher haben hier ein einzigartiges natürliches Labor gefunden, wo sie herkömmliche Verfahren wie das Ausheben von Gräben mit neuen Technologien kombinieren können – etwa der Analyse des Schnees per Satellit. Diese fortgeschrittenen Methoden wollen sie am Polarkreis eichen, um die Lawinenprognose in den heimischen Gebirgen zu verbessern.

Die Bilanz der Unfälle durch Schneeabgänge ist immer wieder erschreckend. ▷

Diese spektakuläre Aufnahme einer Lockerschneelawine entstand am Mount Foraker in Alaska.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Schneebrettlawinen gehen ab, wenn sich die Schneedecke in einem größeren Areal vom Untergrund löst. Sie sind entschieden gefährlicher als Lockerschneelawinen. Bei denen rollt Schnee einen Abhang hinab und reißt anderes Material mit sich, erreicht aber keine hohen Geschwindigkeiten.

▷ Allein in den Alpen gab es in den letzten 25 Jahren im Schnitt jeden Winter hundert Lawinenopfer – fast ausnahmslos Wanderer oder Skifahrer, die das Abenteuer abseits der Piste suchten. Hinzu kommen vereinzelte dramatische Unfälle mit Dutzenden oder Hunderten von Toten und enormen Schäden (siehe Kasten auf S. 90). So lösten sich am 20. September 2002 rund 20 Millionen Tonnen Schnee von einem Gletscher in der Kaukasus-Republik Nordossetien und verschütteten 150 Menschen – darunter den russischen Kinostar Sergej Bodrow jr. und einen Teil seines Teams, das einen Film mit ihm drehen wollte.

Fachleute unterscheiden zwischen Lockerschnee- und Schneebrettlawinen. Der erste Typus entsteht, wenn eine Schneemasse einen Hang hinabstürzt und auf ihrem Weg weiteren Schnee aufnimmt. Daraus resultiert eine Lawine, deren Stirn immer höher wird, die aber eher langsam gleitet und dabei nur relativ kurze Strecken zurücklegt.

Die Schneebrettlawinen sind weitaus gefährlicher. Hier reißen plötzlich ausgedehnte Schichten der Schneedecke ab und rutschen – alles niederwälzend, was sich ihnen in den Weg stellt – en bloc zu Tal. Wenn die Schneedecke instabil ist, kann sie sich schon bei geringer Beanspruchung ablösen – etwa wenn ein Skifahrer darüber hinwegfährt. Meist reißt sie dann den ahnungslosen Verursacher mit in den Tod.

Obwohl in der nüchternen Statistik die Zahl der Schneeopfer verhältnismäßig gering erscheint – vor allem im Vergleich mit den Verkehrstoten –, bilden Lawinen doch seit jeher eine ernste Bedrohung für Leben und Gesundheit sowie Hab und Gut der Gebirgsbevölkerung. Immer wieder verursachen sie erhebliche Schäden an Infrastruktur, Kommunikationseinrichtungen und Privateigentum. In der Schweiz zum Beispiel leben schätzungsweise 65 Prozent der Bevölkerung in lawinengefährdeten Gebieten.

Für vom Schnee Verschüttete ist das Überleben ein Wettlauf gegen die Zeit: Schon nach fünfzehn Minuten droht der Erstickungstod; nach einer Stunde wird nur noch eine von drei Personen lebend geborgen. Erfahrung, Vorsicht und bestimmte Vorkehrungen wie das Tragen eines Peilsenders können manchen retten, der das Abenteuer außerhalb der Piste sucht. Doch der einzige Weg, neue Unglücke zu vermeiden, führt über das Monitoring der Lawinen und ihre Prävention.

Alle Alpen-Anrainerstaaten verfügen ebenso wie Kanada, die USA und Japan über ein modernes Netz von Zentren zur Überwachung und Prognose der Lawinenrisiken. Deren Arbeit hat die Zahl der Unfälle und Opfer in den letzten zwanzig Jahren spürbar reduziert. Anhand meteorologischer Analysen und vor Ort erstellter Profile, die mit früheren Daten verglichen werden, geben die Schnee-Experten Berichte heraus. Skifahrer, die sich daran halten, können so unnötige Risiken vermeiden.

Ferner erstellen die Zentren täglich aktualisierte Karten der Gefahrenzonen, sodass die Verantwortlichen vorbeugende Maßnahmen passiver oder aktiver Natur ergreifen können. Die passive Prävention umfasst das Verbot von Baumaßnahmen bis hin zur Evakuierung akut bedrohter Gebiete, aber auch etwa die Errichtung permanenter Betonwände, um Straßen, Brücken und Bauwerke zu schützen.

Die Reihen von Netzen, Gittern und windbrechenden Barrieren, die oft am Rand von Skipisten zu sehen sind, dienen dagegen zur aktiven Verteidigung. Sie sollen der Ablösung von Lawinen vorbeugen, indem sie die Schneedecke festhalten und unterteilen sowie die Anhäufung von Schnee an den besonders kritischen Stellen verhindern. In vielen Hochgebirgszonen rufen die Verantwortlichen außerdem mit Kanonen oder Sprengstoff kleine, aber spektakuläre Lawinen unter kontrollierten Bedingungen hervor. So wollen sie die Schneedecke entlasten und dem spontanen Abrutschen zuvorkommen.

Wie eine Sahnetorte

Viele Faktoren haben Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit von Lawinen – vor allem Schneefall, Temperaturschwankungen, Stärke und Richtung des Winds sowie Steilheit und Orientierung der Hänge. Entscheidend sind aber fast immer die tieferen Schichten der Schneedecke. Dort suchen die Lawinenforscher nach Anhaltspunkten für ihre Prognosen. »Wie eine Sahnetorte besteht die Schneedecke aus mehr oder weniger kompakten Schichten mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften. Sie sind das Ergebnis vergangener Schneefälle bei unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen«, erklärt Valt.

Eis, Luft und Wasser in variablen Anteilen bilden die Zutaten dieser Torte, die – wie ihr kulinarisches Vorbild – mit der Zeit altert. Hinter diesem Wandel stecken Veränderungen bei den Grundbausteinen des Schnees: den Kristallen, umgangssprachlich mit dem romantischeren Ausdruck »Flocken« belegt.

Auch wenn die gängige Floskel stimmt, dass keine Schneeflocke völlig der anderen gleicht, so hat die Meteo- ▷

Forscher des Lawinenzentrums von Arraba in Trient erstellen im Sommer bei Ny Ålesund auf Spitzbergen (ganz unten) Schneeprofile, um sie mit Reflexionsspektren zu vergleichen, die Satelliten aus dem All aufgenommen haben. Nach dem Aushub von sammeln die Wissenschaftler aus verschiedenen Tiefen Schneeproben und ermitteln mit diversen Messgeräten die genaue Beschaffenheit der Kristalle.

OBEN UND MITTE RECHTS: CRISTINA VALSECCHI; MITTE LINKS UND UNTEN: SERGIO PISTOI

▷ rologische Weltorganisation doch zehn Kristalltypen katalogisiert, die sich als besonders nützlich für die Überwachung des Schnees erwiesen haben. Im Idealfall, bei niedriger Temperatur und schwachem Wind, setzen sich die vertrauten sternförmigen Flocken am Boden ab. Das Ergebnis ist der Traum aller Skifahrer: eine trockene Schicht aus lockerem Pulverschnee. Leider hält diese Situation nicht lange an. Früher oder später verändern sich Temperatur, Sonneneinstrahlung und Feuchtigkeit. Neuerliche Niederschläge fügen weitere Schneemassen hinzu, deren Gewicht die darunterliegenden Schichten zusammendrückt. Dabei wandeln sich die sternförmigen Flocken in Partikel anderer Form und Eigenschaften um.

Folgt zum Beispiel auf einen milden Tag eine Nacht mit Temperaturen knapp unter null, schmelzen die Kristalle und gefrieren dann an den Rändern erneut. Dabei wandeln sie sich in abgerundete Körner von etwa einem halben Millimeter Durchmesser um, die binnen Kurzem miteinander verkitten und sehr stabile Schneeschichten bilden.

Wenn jedoch einige Tage lang Dauerfrost herrscht, so entsteht ein Temperaturgradient zwischen den kälteren Schichten an der Oberfläche und den wärmeren in Bodennähe. Das tiefere Eis sublimiert dann zum Teil, verdampft also, ohne vorher zu schmelzen. Wenige Zentimeter weiter oben aber gefriert der Wasserdampf wieder. So entstehen becherförmige Kristalle von mehreren Millimetern Größe, die seitlich miteinander verkleben. Daraus resultiert eine extrem glatte Schicht, die auch »Tiefenreif« genannt wird. Der darüberliegende Schnee kann darauf wie auf einem Teppich aus lauter Kugeln gleiten und somit beim geringsten Anlass abrutschen.

Zur Lawinenvorhersage sind daher die täglich aktualisierten Daten über die Schneedecke und die Kristalle, aus denen sie sich zusammensetzt, mindestens genauso wichtig wie Informationen über die Temperatur und andere meteorologische Bedingungen. Allerdings kostet es viel mehr Mühe, sie zu erheben. Während die Wetterstationen inzwischen weit gehend automatisch arbeiten, erfordert das Überwachen der Schneedecke noch die geduldige Arbeit im Gelände.

In jedem Gebiet müssen Techniker Dutzende von Gräben ausheben, um die Kompaktheit der diversen Schichten zu überprüfen und die enthaltenen Kristalltypen zu analysieren. Wie viele Profile erstellt werden können, hängt von den vorhandenen Arbeitskräften ab – ganz zu schweigen von den Schwierigkeiten bei schlechtem Wetter und dem Lawinenrisiko für die Techniker selbst. »Die Profile liefern die wichtigsten Daten, aber sie bilden einen echten Flaschenhals bei der gesamten Vorhersage«, resümiert Valt.

Verschneite Alpen im Winter sind eine Idylle für Schneefahrer, aber nicht ohne Risiko: Jedes Jahr fordern Lawinen durchschnittlich hundert Todesopfer.

Die schlimmsten Lawinen

▶ **218 v. Chr. – Westalpen.** Lawinen dezimieren das Heer Hannibals beim Überqueren der Alpen. Chronisten zufolge werden 20 000 Männer und eine unbekannte Zahl von Elefanten verschüttet.

▶ **1618 – Plurs, Schweiz (heute Norditalien).** Eine Lawine begräbt die Stadt Plurs im Veltlin und tötet 2427 Menschen.

▶ **1910 – Wellington, USA.** Eine Lawine verursacht eines der schlimmsten Zugunglücke in der Geschichte der Vereinigten Staaten. Sie kippt zwei Züge um, wobei 97 Fahrgäste ums Leben kommen.

▶ **1916 – italienisch-österreichische Front.** Eine lange Serie von Lawinen tötet mindestens 10 000 Soldaten in beiden Heeren. Während des gesamten Ersten Weltkriegs versuchten die Truppen beider Seiten durch gezielte Sprengungen Lawinen auf die feindlichen Positionen auszulösen.

▶ **1950/1951 – italienische, Schweizer und österreichische Alpen.** Ein außerordentlich schneereicher Winter produziert ungewöhnlich viele Lawinenabgänge. Insgesamt verlieren rund 200 Menschen ihr Leben.

▶ **1954 – Blons, Österreich.** Eine Lawine zerstört den Ort Blons. Neun Stunden später begräbt eine zweite Lawine die Rettungsmannschaften. Insgesamt sterben 200 Personen.

▶ **1962 – Ranrahirca, Peru.** Eine enorme Schneemenge löst sich von den Wänden des Huascarán, des höchsten Bergs von Peru. Sie zerstört die Stadt Ranrahirca und verursacht beachtliche Schäden in Yungay. Eine von ihr ausgelöste Flutwelle im Fluss Santa erreicht weitere Ortschaften talabwärts und fordert noch einmal 4000 Menschenleben. Es ist das schlimmste vom Schnee verursachte Unglück aller Zeiten.

▶ **1979 – Lahaul-Tal, Indien.** Eine Serie von Lawinen stürzt zu Tal und reißt mindestens 200 Personen in den Tod.

▶ **1991 – Bingol, Türkei.** Eine Lawine verwüstet einige Ortschaften und begräbt 255 Menschen unter sich.

▶ **2002 – Nordossetien, Kaukasus.** 20 Millionen Tonnen Schnee lösen sich vom Berg Kazbek, 1500 Kilometer von Moskau entfernt, und verschütten 150 Personen – darunter den russischen Kinostar Sergej Bodrow jr. und einen Teil seines Teams, das mit ihm einen Film drehen sollte.

Hilfe von oben

Diesen Engpass wollen die italienischen Forscher auf Spitzbergen beseitigen. Dazu testen sie neue Systeme, die unmittelbare Aussagen über den Zustand des Schnees liefern, ohne dass man auf die im Gelände erstellten Profile zurückgreifen müsste.

Wenige Meter von dem Graben entfernt, wo Valt seine Arbeit fortsetzt, haben Rosamaria Salvatori und ihre Kollegen vom italienischen Nationalen Forschungsrat inzwischen ihre Instrumente aufgestellt: tragbare Computer und Fotodetektoren. Bevor die Forscher den Spaten ansetzten, hatten sie Satellitenbilder des betreffenden Gebiets auf ihre Laptops geladen – allerdings keine normalen Fotos, sondern radiometrische Aufzeichnungen der Lichtmenge, die der Schnee bei verschiedenen Wellenlängen reflektiert. Letztere erscheinen jetzt auf den Computerbildschirmen, kodiert in künstlichen Farben. »Wie viel Licht bei den einzelnen Wellenlängen zurückgeworfen wird, hängt von der Dichte des Schnees, von seinem Wasser- und Luftgehalt und vom Typ der enthaltenen Kristalle ab. Deshalb können uns die Bilder Auskunft über die Eigenschaften des Schnees geben«, erklärt Salvatori.

NASA, GSFC, MODIS RAPID RESPONSETEAM, JEFF SCHMALTZ

»Spitzbergen ist für uns ein ideales Labor«, fährt die Forscherin fort. »Hier gibt es enorme Schneeflächen und keine Umweltverschmutzung; zudem geht von Mai bis September die Sonne nie unter.« Auch in früheren Jahren, in denen Polarkampagnen stattfanden, haben die Forscher schon die Satellitenbilder mit Profilen derselben Stellen am Boden verglichen. So konnten sie die radiometrischen Daten mit den tatsächlichen Charakteristika der Schneedecke korrelieren. Dabei entdeckten sie zum Beispiel, dass Gebiete mit frischem, feuchtem oder erneut gefrorenem Schnee jeweils unverwechselbare Reflexionsspektren im Infrarotbereich liefern. In diesen spiegelt sich auch wider, ob die Kristalle sternförmig oder durch den Wind abgerundet sind.

»Innerhalb gewisser Grenzen können wir heute allein aus Satellitendaten erschließen, welcher Schneetyp auf dem Boden liegt«, erklärt Salvatori nicht ohne Stolz. Ein Team an der Universität von Colorado in Boulder hat das Verfahren ebenfalls erprobt und ähnliche Resultate erzielt wie die italienischen Forscher. Parallel dazu haben andere Zentren wie das Eidgenössische Institut für Schnee- und Lawinenforschung in Davos Computermodelle für die Lawinenprognose anhand von meteorologischen Daten entwickelt, die allerdings noch nicht perfekt sind. In Zukunft lässt sich durch Kombination von Simulationen und Satellitendaten vielleicht die Vorhersage von Lawinen entscheidend vereinfachen und verbessern.

Die Bilder aus dem All haben freilich einen Nachteil: Sie liefern nur Informationen über den obersten Teil der Schneedecke. Deshalb werden sie nach Ansicht der Forscher nicht alle am Boden gewonnenen Profile ersetzen können. Die Hoffnung ist jedoch, dass sie ein engmaschigeres Monitoring ermöglichen. Profile könnten dann auf die am stärksten gefährdeten Bereiche beschränkt werden, was die Arbeit der Schnee-Experten erleichtern würde. Per Satellit ließe sich zum Beispiel feststellen, ob in einer schwer zugänglichen Zone viel frischer Schnee gefallen oder oberflächlicher Reif vorhanden ist – Verhältnisse, die das Lawinenrisiko erhöhen. Daraufhin könnte das Zentrum Techniker hinschicken, um genauer nachzusehen.

Die größte Herausforderung besteht jetzt darin, die Ergebnisse, die im natürlichen Labor der Arktis unter Idealbedingungen gewonnen wurden, in die Realität unserer Gebirge zu übertragen. Dort kommen erheblich mehr Variablen ins Spiel, darunter vor allem die Steilheit der Hänge, das Ausmaß der Beschattung und auch die Umweltverschmutzung. »Es wird nicht leicht sein und noch eine Menge Anpassung und Experimentieren kosten«, meint Salvatori abschließend. »Aber wir haben gezeigt, dass das System funktionieren kann, und wir sind optimistisch.« ◁

Sergio Pistoi ist Biologe und freiberuflicher Journalist. Er arbeitet mit verschiedenen Zeitschriften zusammen, darunter »Le Scienze«, »Scientific American« und »New Scientist«. Für seinen Artikel besuchte er die italienische Forschungsbasis in Ny Ålesund auf Spitzbergen.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Lawinenhandbuch. Von K. Gabl und B. Lackinger (Hg.). Tyrolia-Verlag, 2000

Study of the snow melting-refreezing cycle using multi-sensor data and snow modelling. Von A. Cagnati et al. in: Journal of Glaciology, Bd. 50, S. 419, Juni 2004

Usage of high-resolution Landsat 7 band 8 for single-band snow-cover classification. Von S. W. Vogel in: Annals of Glaciology, Bd. 34, S. 53, 2002

Radiometric investigation on different snow covers in Svalbard. Von R. Casacchia et al. in: Polar Research, Bd. 20, S. 13, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

REZENSIONEN

VULKANOLOGIE

Gerd Simper

Vulkanismus verstehen und erleben

Feuerland, Feuerbach 2005. 452 Seiten, € 48,30

Gerd Simper arbeitet weder als Wissenschaftler noch als Journalist, sondern verdient seinen Lebensunterhalt als Ingenieur für Motorenprüfstände. Kann so jemand ein ernst zu nehmendes Buch über Vulkane schreiben? Er kann. Seine Faszination für den Vulkanismus hat ihm geholfen, auch auf diesem Gebiet kompetent zu werden. Seit zwei Jahrzehnten ist er überall auf der Welt unterwegs und setzt sich mit dem Thema intensiv auseinander. Mit dem Ziel, den Funken der Begeisterung auf den Leser überspringen zu lassen, hat er einen umfangreichen Vulkan-Reiseführer verfasst, mit seriösen Informationen aus der Fachliteratur unterfüttert, mit eindrucksvollen Fotos bestückt und dann im Selbstverlag herausgegeben.

Wer eingängige Geschichten über Vulkanausbrüche, Geysire und Schwefelquellen erwartet, wird enttäuscht sein. Simper verpackt Fakten nicht – er vermittelt sie im Stil einer Geologievorlesung. Schließlich will er den Leser nicht unvorbereitet auf die Reise schicken.

Der erste Teil befasst sich wahrhaft umfassend und in logischer Reihenfolge mit den Grundlagen des Vulkanismus. Nach einem Drittel des Buchs kennt der Leser nicht nur die verschiedensten Formen von Magma und Lava, sondern weiß auch, wo, wann, auf welch vielfältige Weise und mit welchen Folgen Vulkane ausbrechen können.

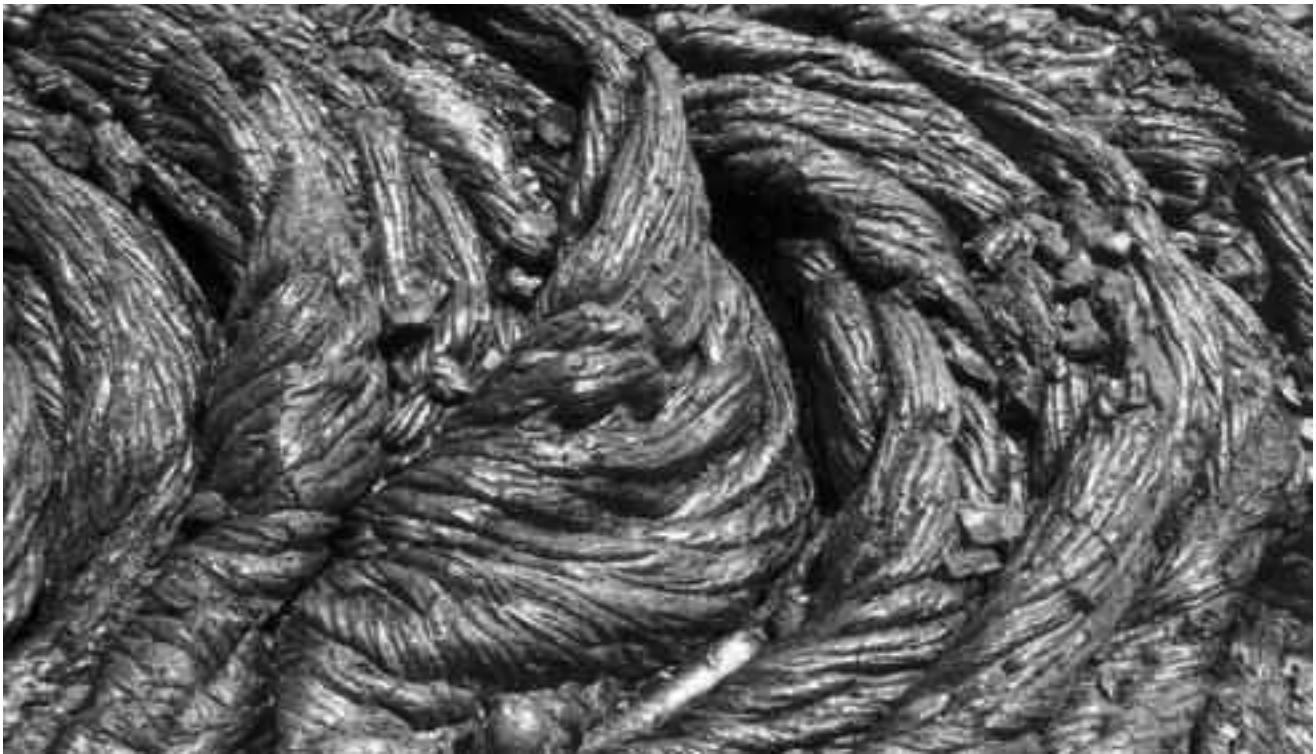
Leider fehlt den Texten selbst häufig eine klare Struktur. Die Informationsflut erschwert das Verständnis. Da hilft es wenig, wenn Teilinformationen in blauen Kästchen ausgegliedert sind und Begriffe oder Satzteile – scheinbar willkürlich – fett hervorgehoben werden. Wissenschaftliche Formulierungen wirken oft krampfhaft untergebracht: »Flachbeben entstehen in null bis 30 Kilometer Tiefe durch Sprödbruch deformierter Plattenteile.« Einiges hätte sich auch einfacher sagen lassen. Trotz dieser Schwächen kommt der überdurchschnittlich interessierte Laie bereits im ersten Teil des Buchs auf seine Kosten – die Fülle spannender Fakten ist einfach bestechend.

Eine wahre Perle aber ist der Reiseteil. Kein anderes Einzelwerk beschreibt deutsche, europäische und US-amerikanische Vulkangebiete derart ausführlich. Sein Ziel, »Vulkangebiete in ihrer ganzen Vielfalt darzustellen«, hat Gerd Simper zweifellos erreicht. Dabei interessieren ihn nicht nur die aktiven, sondern auch die weniger spektakulären, die ruhenden und die erloschenen Vulkane.

Allerdings musste sich Simper hier beschränken, denn wer hätte gedacht, dass es allein zwischen Göttingen, Kassel und Gießen rund 2000 Vulkanbauten zu beschreiben gibt? Bei der Eifel geht er ins Detail – zu Recht, denn hier haben sich dramatische Szenen abgespielt: Als vor rund 11 000 Jahren der Vulkan ausbrach, dessen Krater heute der Laacher See füllt, förderte er sechsmal so viel Material wie der Mount St. Helens im Jahr 1980. Heute finden sich in der Eifel Basaltpfeiler, Maare und Mineralwasserquellen auf engstem Raum, und der interessierte Besucher kann seinen Wissensdurst in Museen, Besucherzentren und auf geologischen Wanderwegen stillen. In Simpers Buch erfährt er, was sich hier lohnt. Mit genauen Wegbeschreibungen macht er auf Attraktionen aufmerksam, die dem ungeschulten Auge entgehen würden. Und wer eine Pause braucht, kann »im Vulkan-Brauhaus auf ein naturtrübes Vulkan-Bräu« einkehren.

Ebenso gehaltvoll behandelt Simper die Vulkangebiete der USA. Beeindruckende Bilder verlocken dazu, sich alles in natura anzusehen. Und auch hier gibt es viel zu erklären, wurden die Feuerberge doch in kaum einem anderen Land derart gründlich studiert. Asien hingegen kommt nur am Rande vor, und die schlecht erforschten Vulkane Südamerikas spart der Reiseteil ganz aus.

Eine dünne, abgekühlte Haut an der Oberfläche eines Lavastroms wird durch die darunter weiterströmende heiße Lava zu seilartigen Strukturen zusammengeschoben: frische Stricklava vom August 2002 auf Kilauea (Hawaii).



Während das Wasser die dicken Ascheschichten eines Vulkanausbruchs längst erodiert hat, blieben diese bizarren Wände von Entgasungsröhren am Mount Mazama in Oregon stehen.

Trotz des Glossars lässt das Zusammenspiel zwischen Grundlagenteil und Reiseführer Wünsche offen. Hintergrundinformationen lassen sich schwer gezielt auffinden, da hier mehr Wert auf Vollständigkeit als auf Übersichtlichkeit gelegt wurde.

Kritik lässt sich also vor allem an der Struktur des Buchs üben, nicht aber am Inhalt. Denn selbst wer schon einiges über Vulkane weiß, wird mit Sicherheit noch vieles dazulernen. Blutige Laien werden sich zwar hin und wieder überfordert fühlen. Doch wer ein echter Vulkanliebhaber ist, wird sich davon nicht einschüchtern lassen und wegen der Fülle an Information die 1,7 Kilogramm willig an jeden Kraterrand schleppen.

Katharina Grund

Die Rezensentin ist Diplomgeografin und freie Wissenschaftsjournalistin in Erlangen.

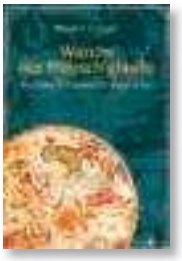
RELIGION

Martin Urban

Warum der Mensch glaubt

Von der Suche nach dem Sinn

Eichborn, Berlin 2005. 256 Seiten, € 19,90



Martin Urban, mehr als dreißig Jahre lang Leiter des Wissenschaftsressorts der »Süddeutschen Zeitung«, hat sich eine umfangreiche Aufgabe gesetzt. Die Ursprünge des Glaubens sollen aus den biologischen und psychologischen Wurzeln erklärt werden, und außerdem soll dabei noch Licht auf die vielgestaltige Frage nach dem Sinn des Lebens fallen. Das Buch ist im Plauderton geschrieben und verbindet in gefälliger, aber semantisch unscharfer Weise weit auseinander liegende Wissensgebiete.

Am überzeugendsten ist das Kapitel »Glaube und Macht«. Hier macht Urban deutlich, wie viel Fälschung, Betrug und Autosuggestion in der orthodoxen spirituellen Überlieferung der katholischen Kirche enthalten ist. Engagiert schildert er den psychologischen Missbrauch der Beichte und die Unterdrückungsmechanismen unter Ausnützung des Sündenbewusstseins der Menschen sowie das perverse Verhältnis der christlichen Moraltheologie zur Sexualität.

Informativ und vielleicht nicht jedem bekannt sind die Darlegungen zur islamischen und jüdischen Moral fundamentalistischer Prägung. Diese Grundhaltung ist zweifellos eine Ursache der Schwierigkeiten im Verhältnis mit der säkularen Gesellschaftsform in Europa. Hier breitet der Autor auch das ganze Arsenal von Irrationalitäten der Religion aus, von den Wirkungen des Heiligen Geistes bis zu den Unfehlbarkeitsverkündigungen der Kirche.

Im Gesamteindruck wirkt das Werk jedoch in erster Linie konfus, unentschlossen und schlecht informiert. Der Autor zitiert sehr viel – und unterlässt es dann, in der Landschaft seiner zahlreichen Quellen einen eigenen Standpunkt zu bestimmen. Bei den kniffligen Problemen, etwa dem der Willensfreiheit, bezieht er keine Stellung. Er sieht sich außer Stande zu sagen, was die Seele wirklich ist, obgleich es hierzu glasklare Analysen von Paul Churchland oder Mario Bunge gibt.

Bei der Frage nach Sinn stiftenden Quellen nennt Urban auch die Bibel, aber es wird letztlich nicht klar, ob er sie für einen verlässlichen Leitfaden zur Lebensgestaltung hält oder nicht – zu divergierend sind die Kommentare. Aus der historischen Forschung zum Alten Testament schildert er einiges, kann sich aber weder zu einer systematischen Religionskritik noch zu einer entschiedenen Glaubensverteidigung durchringen. Nur an der Himmelfahrt Mariens äußert der Autor gewisse Zweifel.

Nicht einmal zur Astrologie, die nun wirklich gut untersucht wurde, wagt sich der Autor an eine definitive Beurteilung heran. Viele Fakten aus der Religionsgeschichte, die in dem Buch ausgebreitet werden, sind von Religionshistorikern wie Karl-Heinz Deschner, Horst Herrmann und Hans Albert akribisch kritisiert worden. Aber Urban schweigt über die gesamte Gruppe der argumentierenden Religionsanalytiker, wohl weil er sich zu keinem definitiven philosophischen Standpunkt gegenüber den Gehalten der Religionen durchringen kann. Gerade der von ihm zitierte biblische Taufbefehl in Markus 16, 15 – 16 (»Wer da glaubt und getauft wird, der wird selig werden; wer aber nicht glaubt, der wird verdammt werden«), wäre sehr gut geeignet gewesen, sich Gedanken über die Humanität der jesuanischen Ethik zu machen. Allerdings haben andere Autoren wie Gerhard Streminger dies längst geleistet.

Im Kapitel XII »Das Scheitern der Aufklärung« spricht Urban ein weiteres Thema an, das sich systematisch hätte behandeln lassen: das Verhältnis von Rationalität und Glaube. Aber wieder kommt weder ein richtiger Argumentationsablauf zu Stande noch eine eigene Meinung.

Nur verklausuliert und ohne weitere argumentative Unterstützung bekennt er sich schließlich doch zur jesuanischen Gottesvorstellung, mit einem völlig ungeschützten Bekenntnis zu intuitiven Wahrheiten. Wie man von Gott reden soll? In John Leslie Mackies Buch »Das Wunder des Theismus« hätte er es nachlesen können, aber die gesamte analytische Philosophie kennt er offenbar nicht.

Das ganze Buch besteht aus einem methodisch ungeordneten Mäandrieren durch die heutige Weltanschauungslandschaft. Es scheint doch so zu sein, dass eine saubere begriffliche Schulung durch nichts zu ersetzen ist.

Bernulf Kanitscheider

Der Rezensent ist Professor für Wissenschaftstheorie in Gießen.

MEDIZINETHIK

Hans-Peter Schreiber (Hg.)

Biomedizin und Ethik

Birkhäuser, Basel 2004. 142 Seiten, € 19,80

Längst hat die biomedizinische Praxis die herkömmlichen Begriffe von Recht und Moral erschüttert, neue normative Standards gesetzt und unseren Erwartungshorizont irreversibel verschoben. Der Schweizer Theologe und Philosoph Hans-Peter Schreiber möchte daher geklärt wissen, welche der historisch gewachsenen und bislang kulturell fest verankerten Normen und Werthaltungen uns angesichts des rasanten Aufschwungs der biomedizinischen Forschung auch weiterhin als Richtschnur des Handelns dienen können.

Schreiber war Leiter der »Fachstelle für Ethik und Technikfolgen-Abschätzungen« an der ETH Zürich sowie wissenschaftlicher Beirat des »Deutschen Human-Genom-Projektes«. Inzwischen ist er Vorsitzender des Ethikrates von Novartis International, dem Pharmakonzern, der 1996 durch Fusion der Firmen Ciba-Geigy und Sandoz gegründet wurde. Es verwundert daher nicht, dass es in diesem Buch nicht nur um ethisches Handeln, sondern vor allem auch um die Freiheit der Forschung geht. Beiträge, die sich kompromisslos gegen eine Entkoppelung von Menschenwürde und Lebensschutz wenden, darf der Leser nicht erwarten; abschließende Bewertungen fehlen. Denn der Herausgeber geht prinzipiell von wandelbaren ethischen und rechtlichen Normen aus.

In diesem Sinn hat Schreiber zehn weitere Autoren aus den Geistes-, Sozial- und Naturwissenschaften eingeladen, um in den drei Kapiteln »Praxis«, »Recht« und »Moral« die ethischen Schlüsselfragen der Biomedizin zu charakterisieren und zu verknüpfen. Im Anhang, der immerhin das letzte Drittel des Buchs einnimmt, sind nicht nur Literaturhinweise und Angaben zu den Autoren abgedruckt, sondern auch wichtige nationale und internationale Vereinbarungen zur Bioethik, insbesondere die europäische Bioethikkonvention und das deutsche Embryonenschutzgesetz.

Der einleitende Praxisteil klärt über den Wissensstand der Humangenetik und über die Möglichkeiten zur genetischen Diagnostik und Beratung auf. Zudem wird über das Klonen embryonaler Stammzellen sowie die Speicherung menschlicher Körpersubstanzen nebst genetischen und anderen medizinisch relevanten Daten in Biobanken nachgedacht – in der Tendenz eher restriktiv. So plädiert der Leiter der Genetischen Beratungsstelle an der Universität Freiburg, Gerhard Wolff, für eine genetische Beratung »unter Verzicht auf überindividuelle Ziele sowie Vermeidung jeden direkten oder indirekten Zwanges«. Und der Baseler Mediziner Alois Gratwohl hält das therapeutische Klonen menschlicher Stammzellen nur dann für ethisch akzeptabel, wenn es gelingt, das reproduktive Klonen international zu ächten.

Im juristischen Teil werden die Anwendung unserer Grundrechte auf das vorgeburtliche Leben, die Patentierung von Lebewesen sowie das Verhältnis von Recht und Moral erörtert. Der Baseler Verfassungsrechtler Markus Schefer konstatiert im Blick auf die Dauerdebatte über die Embryonen- und Stammzellenforschung, dass sich mit der »bloßen Berufung auf die Grundrechte«, insbesondere die Menschenwürde, kein moralischer Konsens mehr erzielen lasse. Der Umkehrschluss, dass der Menschenwürde mit der bloßen Berufung auf den medizinischen Fortschritt wohl kaum Genüge getan sein wird, kommt Schefer allerdings nicht in den Sinn.

Zum Kapitel »Moral« leitet der Bonner Strafrechtler und Rechtsphilosoph Günter Stratenwerth über, indem er das Recht als »sittliches Minimum« von der individuellen glaubens- und gewissensabhängigen Moral abgrenzt. Auch hier zeigt sich wiederum die Tendenz, den »glaubens- und gewissensabhängigen« Part professionellen Bedenkenträgern zu überlassen. Was durchaus riskant ist, da aller Erfahrung nach auch ein »sittliches Minimum« sich im Ernstfall nur erhalten lässt, wenn sich das individuelle Gewissen regt.

Sollte man nun das Klonen von Menschen aus moralischen Gründen zum Tabu erklären? Der Berliner Soziologe Wolfgang van den Daele verneint, indem er erklärt: »Tabus gibt es oder es gibt sie nicht; man kann sie nicht durch poli-

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

Robert Winston (beratender Herausgeber)

Der Mensch

Die große Bild-Enzyklopädie

Dorling Kindersley, Starnberg 2005, 512 Seiten, € 49,90

Dieser neue Band bietet nahezu alles, was es über den Menschen mitzuteilen gibt, und das ist sehr viel: Immerhin existiert der *Homo sapiens* bereits seit etwa 150 000 Jahren. Wie schon bei den Vorgängern »Tiere« und »Die Erde« wurde ein brillanter Mittelweg zwischen Wissensvermittlung und Unterhaltsamkeit gefunden. Ein fünfseitiges Glossar sowie 19 fünfspaltige Registerseiten erklären die wichtigsten Begriffe und machen sie rasch auffindbar. Stets binden die Autoren veranschaulichende Beispiele, Grafiken, Bilder und Info-Kästen in den Text ein. So gelingt es ihnen, eine Menge Wissen auf kleinem Raum zu platzieren. Und alles ist interessant und größtenteils auch aktuell und richtig: ein Buch für wissbegierige Laien und Fachleute zugleich.

Aus der Rezension von Claudia Borchard-Tuch

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■
Vermittlung	■■■■
Verständlichkeit	■■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■■
Gesamtpunktzahl	23

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/rezensionen**

tische Entscheidungen herstellen.« Für gesetzliche Verbote braucht es heutzutage »handfeste Gründe«. Die könnten im Fall des Menschenklonens in dem »funktionalen Argument« bestehen, »dass ein striktes Gebot notwendig ist, um anerkannte Rechtsgüter zu schützen«.

Dass oftmals bereits die bloße Reflexion wissenschaftlicher Erkenntnisse ethischen Verwerfungen vorbeugen kann, beweist der Münsteraner Philosoph Kurt Bayertz, indem er allen eugenischen Bestrebungen zur »Verbesserung« der Nachkommenschaft mit der lapidaren Feststellung »Was heute ›gut‹ ist, muss es in der Zukunft nicht sein« eine erfreulich klare Absage erteilt. Den Begriff der Menschenwürde sucht Bayertz hingegen zu relativieren: Er nimmt zwar in den bioethischen und biopolitischen Debatten der Gegenwart eine Schlüsselstellung ein, kann uns aber das »mühsame Vergleichen und Abwägen« nicht ersparen, denn er ist »inhaltlich keineswegs eindeutig bestimmt«. So ist nicht von vornherein klar, ob eine embryonale Stammzelle unter den Menschenwürdebegriff fällt. Doch kann diese Ethik des Zellenzählens wirklich darüber hinwegtäuschen, dass am Ende der Embryonalentwicklung, so man sie denn zulässt, ein individueller Mensch steht?

Eine moderne liberale Wertordnung müsse doch »zum rechtlichen und moralischen Kompromiss fähig« sein und sollte zugleich eine optimale Transparenz und Kontrolle gewährleisten. Gegen diese pauschale Forderung des Herausgebers ist wenig einzuwenden; nur fehlen uns offenbar noch die Kriterien, um mit hinreichender Sicherheit zwischen Wertewandel und Werteverfall zu unterscheiden.

Jedenfalls bietet dieses lesenswerte Buch eine wichtige Zwischenbilanz über die interdisziplinäre Suche nach nachhaltigen Lösungen im Bereich der biomedizinischen Ethik.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist in Celle.

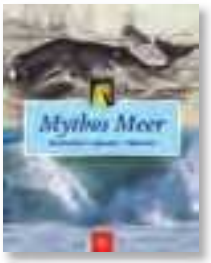
MEERESFORSCHUNG

Monika Rößiger und Claus-Peter Lieckfeld

Mythos Meer

Geschichten, Legenden, Tatsachen

BLV, München 2004. 224 Seiten, € 19,95



Noch ein Meeresbuch, aber ganz anders! Dieses Buch ist einmalig in seiner Zusammensetzung aus faktenreichem Sach-, spannendem Geschichts- und vielseitigem Bilderbuch.

Monika Rößiger, Biologin und Wissenschaftsjournalistin, und Claus-Peter Lieckfeld, Journalist mit einer Vorliebe für die »belebte Umwelt«, werfen einen Blick auf den Weltozean und auf die Geschichten, die von ihm inspiriert werden. Diese Geschichten sind in der Mehrzahl so themenübergreifend, dass die Unterteilung in Großkapitel (»Der blaue Planet«, »Die Kreaturen«, »Die Schätze« und »Mythen, Märchen und Legenden«) fast überflüssig erscheint. Das Buch zählt zu jener Gattung Literatur, die kein Ende und keinen Anfang hat: Durchblättern, Überfliegen, Hängenbleiben heißt die Devise. Für Überraschung sorgt dabei stets die bunte Mischung aus Fakten, witzigen Anekdoten, Fotos und Gedichten.

So beginnt das Kapitel über die Wellen, »Lieblich, lustig, lyrisch oder lebensgefährlich?« eher pädagogisch mit einer Geschichte aus dem Physikunterricht. Wenige Absätze später ist Lieckfeld bei dem Lied »Wo die Nordseewellen schlagen an den Strand«, das ursprünglich die Ostseewellen besang. Über Rainer Maria Rilkes Ode »Ich lieb ein pulsierendes Leben« an das ozeanische Lebensgefühl geht es weiter zur Geschichte des Surfbretts, das die Polynesier bereits zwischen 2000 und 1500 v. Chr. als Beförderungsmittel benutzten. Die Flutkatastrophe vom Dezember 2004 hatte zum Zeitpunkt der Texterstellung noch nicht stattgefunden; gleichwohl erklären die Autoren die Entstehung und die Gefahren von Tsunamis und sind mit dem wichtigen Hinweis auf zu entwickelnde Frühwarnsysteme tagesaktuell.

Bei der Fülle der ausgeschmückten Themen kann die Tiefe nicht endlos sein. Manchmal fehlt es an Genauigkeit, und der schnelle Wechsel zwischen wissenschaftlichen und literarischen Teilen ist nicht einfach nachvollziehbar, ▷

Das »Spiel der Wellen« von Arnold Böcklin (1827–1901) wurde zum Klassiker im Genre der neckischen Badeszenen.

▷ doch zweifelsohne unterhaltsam. So stößt man beim Schmökern unversehens auf den rothaarigen Pumuckl, der sonst an der Seite von Meister Eder von sich reden macht. Aber das hat schon seine Richtigkeit: »Pumuckl ist von Geblüt ein Klabautermann, wie er nicht müde wird zu versichern.« Was man ihm allerdings nicht ohne Weiteres glauben darf, denn ob Klabautermänner außerhalb eines Schiffs überhaupt lebensfähig sind, ist zweifelhaft.

Auch das Unterkapitel über Seepferdchen überrascht. Nicht weil zu erfahren ist, dass die Männchen die Schwangerschaft und Geburt absolvieren (das teilte uns Monika Rößiger bereits in Spektrum der Wissenschaft 10/2003, S. 78 mit), sondern weil inmitten der faszinierenden Wesen ein deutscher Dichter und Kabarettist auftaucht. Seepferdchen galten nämlich bei den Seeleuten als Glücksbringer und wurden von ihnen liebevoll »Ringelnass« genannt. Auf der Suche nach einem Künstler- und Tarnnamen nannte sich der Schiffsjunge und spätere Matrose Hans Bötticher – Joachim Ringelnatz. Seiner Verbundenheit mit den Seepferdchen verlieh er sogar mit einem eigenen Gedicht Ausdruck. Und unmittelbar danach kommt die Biologie dieser Tiere: »mit einem Paarungsritual, das die Herzen von Romantikern höher schlagen lässt, und einem Rollentausch, wie er so in der Natur kein zweites Mal vorkommt.«

Nardine Löser

Die Rezensentin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Rostock.

GENETIK

Wolfram Henn

Warum Frauen nicht schwach, Schwarze nicht dumm und Behinderte nicht arm dran sind

Der Mythos von den guten Genen

Herder, Freiburg 2004. 190 Seiten, € 9,90

Frauen seien nichts als verkrüppelte Männer, glaubte der antike Philosoph Aristoteles; der Neurologe Paul Julius Möbius schrieb 1900 eine wissenschaftliche Abhandlung über den »physiologischen Schwachsinn des Weibes«, und noch Max Planck hielt Frauen für zum Studieren ungeeignet. Über die Minderwertigkeit von Schwarzen, Asiaten, Juden und Schwulen grassieren ähnlich hartnäckige Vorurteile, für die sich sogar eine wissenschaftliche Begründung zu finden scheint. So gab es im Lauf der Geschichte immer wieder Versuche, die Minderwertigkeit einzelner Gruppen durch »schlechte« Gene zu erklären.

Mit solchen Klischees und Mythen räumt der Humangenetiker Wolfram Henn erbarmungslos auf. Und der 44-Jährige weiß, wovon er spricht: Henn lehrt an der Universität des Saarlandes in Saarbrücken Humangenetik und Ethik in der Medizin und gehört zur Kommission für Grundpositionen und ethische Fragen der Deutschen Gesellschaft für Humangenetik. Da die Liste der biologischen Vorurteile recht lang ist, hat sein Buch zahlreiche Kapitel – eines pro Vorurteil.

Schon das erste Kapitel stürzt ein ganzes Weltbild um – und zwar das vom Menschen als der »Krone der Schöpfung«. Genetische Stammbäume zeigen, dass der Mensch in der Hierarchie der Arten eine wesentlich weniger prominente Stellung einnimmt, als ihm lieb sein dürfte. Demnach hat die DNA des *Homo sapiens* weniger Basenpaare als die eines Grashüpfers, und manche menschlichen Enzyme im Zellstoffwechsel sind denen eines Rindviechs relativ ähnlich.

Auch die Abstammungsgeschichte des Menschen wird von Henn genetisch durchleuchtet. In Amerika herrschte lange Zeit das von Louis Agassiz (1807 – 1873) in die Welt gesetzte Vorurteil vor, Schwarze seien zoologisch von Weißen zu trennen, da »sie in ihrer Abstammung nicht auf Noah zurückgeführt werden könnten«. Eine biologische Parole, die amerikanische Kreationisten auch heute noch gerne aufgreifen, die aber durch die Analyse von mitochondrialen Stammbäumen widerlegbar ist. Demnach stammen wir, gleich welcher Hautfarbe, alle von gemeinsamen Vorfahren ab, die ihren Ursprung in Afrika haben. »Weiß waren (Adam und Eva also) mit Sicherheit nicht.« Die nächsten noch lebenden Verwandten unserer Urahnen sind nach Henn vermutlich die südafrikanischen Khoisan: Buschleute, deren mitochondriale und Y-chromosomale Genvarianten etwa 120 000 Jahre alt sind.

Im Licht der Molekularbiologie verwandelt sich auch Aristoteles' Auffassung von der Frau in ihr schieres Gegenteil: Nicht die Frau ist ein verkrüppelter Mann, sondern der Mann eine umprogrammierte Frau. Jeder Embryo besteht zunächst aus rein mütterlichem Gewebe, erst im Vierzellstadium werden die väterlichen Gene und damit die männlichen Geschlechtshormone aktiv.

In einem weiteren Kapitel beschreibt Henn, wie in der Geschichte mit behinderten Menschen umgegangen wurde: Immer wieder wurden sie versklavt, getötet oder klerikalen Teufelsaustreibungen unterworfen. Selbst Größen wie Haeckel und Darwin sprachen bei angeborenen Behinderungen von »Rückfällen in niedere Stufen der Evolution«, die in zivilisierten Gesellschaften eliminiert werden müssten. Stephen Hawking hätte unter seinen berühmten Wissenschaftlerkollegen nichts zu lachen gehabt!

Henn dagegen erteilt allen Ideen, den menschlichen Genpool durch eugenische Auslese von derlei Ausfällen zu reinigen und dabei im Sinne der »Rassereinheit« zu vereinheitlichen, eine klare Absage: »Kein Mensch ist perfekt. Jeder (besitzt) seine ganz persönliche Konstellation von genetischen Risikofaktoren.« Dabei könnten sich manche Genvarianten durchaus vorteilhaft auf unsere Überlebenschancen auswirken, wie Sportlichkeitsenzyme oder Immunsystemvarianten, die Aids keine Chance lassen. Diese »Manövriermasse der Evolution« sei ein naturwissenschaftliches Argument »gegen jeden Versuch der gezielten Vereinheitlichung des menschlichen Genbestandes«. Fazit: »Es ist gut, dass wir so sind, wie wir sind, in all unserer Verschiedenheit und Imperfektion.«

Wolfram Henn schlägt in seinem Buch mehr als einmal eine Brücke zwischen dem gesellschaftlichen Moralbegriff einerseits und genetischen Fakten andererseits – manchmal sehr kühne Brücken, die aber auch neue Perspektiven aufzeigen und zur Diskussion anregen können. Der bunte Strauß an Themen bietet wenig Überraschung für die Fachleute, aber einen verständlichen Einblick in die vorurteilsbeladene Welt der Humangenetik. Die vielen Fakten machen die Lektüre sehr spannend, aber manchmal auch recht mühsam, und kein Stichwortverzeichnis hilft dem im Detail Verlorenen wieder auf die Sprünge. Schonungslos deckt der Autor anhand von Originalzitaten eine oft grausame Geschichte auf, in der viele namhafte Köpfe mit weniger rühmlichem Gedankengut eine Rolle spielten. Wenn Henn korrekt recherchiert hat, dann haben die berühmtesten Vertreter der Wissenschaft einige schwarze Flecken auf der Weste.

Kerstin Beckert

Die Rezensentin ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Stuttgart.

KABARETT

Dietrich Paul

PISA, Bach, Pythagoras

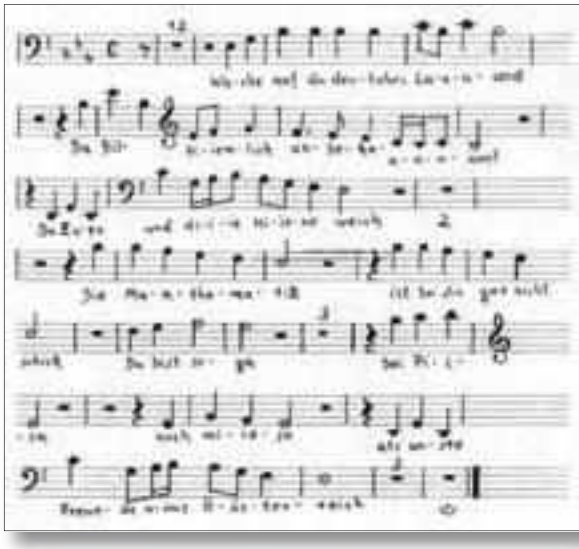
Ein vergnügliches Kabarett um Bildung, Musik und Mathematik

Vieweg, Wiesbaden 2005. 214 Seiten, mit CD, € 24,90

Kann man mit dem Thema Mathematik Kabarett machen? Und wie! Das Leben selbst schreibt die beste Satire. Ein knackiges Beispiel ist dieser Satz aus einer Veröffentlichung der SPD-Parteizentrale: »Die erfolgreiche Haushaltskonsolidierungspolitik von Finanzminister Hans Eichel muss fortgesetzt werden, da heute schon fast jeder zweite Euro (d. h. jede vierte Mark) für den Schuldendienst verbraucht wird.« Die seriöse Tagespresse (die schon mal »6 Prozent« mit »jeder sechste« verwechselt) und Volkshochschulen (bei denen gelegentlich das komplette naturwissenschaftliche Programm aus »Astrologie 1« bis »Astrologie 3« besteht) sind ergiebige Quellen.

Dietrich »Piano« Paul ist nicht nur gelernter Mathematiker, sondern auch ein versierter Pianist, und er weiß beides auf das Würzigste zu verbinden. Was ist es, das bei lateinamerikanischen Tänzen das Becken kreisen macht? Die Tatsache, dass 3 und 4 teilerfremde Zahlen sind! In einer anderen Nummer seines Kabarettabends behauptet Piano Paul, den »stilspezifischen Transformationsoperator« T_{Moz}: MUS → MUS (Moz wie Mozart, MUS ist die freie Halbgruppe über dem Zeichenvorrat der zwölf Töne der wohltemperierten Stimmung) auf a_0 = »Happy Birthday« angewandt zu haben. Das Ergebnis des pseudomathematischen Akts klingt schon ziemlich nach Mozart; aber die zwei- oder dreistelligen Transformationsoperatoren, die zum Beispiel »Happy Birthday«, »Für Elise« und den »Entertainer« zu einem Gesamtwerk im Stil Richard Wagners mischen – das ist kunstvoll komponiert.

Die stärksten Stücke sind die, in denen Paul uns die Antwort auf wahrhaft elementare und lebensrelevante Fragen (»Warum ist es im Sommer wärmer als im Winter?«, »Wie viele Spiele finden in einer Fußballliga mit *n* Vereinen statt?«) mit sauber ausgeführter Mathematik gibt. Das dauert eine Weile; denn Paul rechnet uns die Sache schon so vor, wie sich das gehört, mit Induktionsbeweis als Kabaretteinlage. Zur Unterdrückung des Matheekelreflexes unterbricht er die Darstellung häufig durch kleine bis mittlere Abschweifungen und untermalt Wichtiges akustisch: »Photonen am Nordpol: zoing. Gran Canaria: ding-dong. Äquator: ding-ding-ding-ding-ding.« Jetzt wissen Sie, warum manche Leute im Winter so gerne auf Gran Canaria Urlaub machen.



Das »Wunder der Polyphonie« erläutert Paul an der Vertonung des Chorals »Wachet auf, ruft uns die Stimme« von Johann Sebastian Bach – und legt einen neuen Text unter die Melodie.

Am Ende füllt ein einziges Abendprogramm mühelos ein ganzes Buch. Und eine CD mit Musikbeispielen ist auch dabei, für alles, was das bedruckte Papier selbst bei erheblicher Freiheit in der Gestaltung nicht wiedergeben kann.

Eigentlich ist das ja mit Pisa und dem allgemeinen Bildungsverfall alles ganz furchtbar. Aber dennoch hat sich Pöppe ganz köstlich amüsiert.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Alle rezensierten Bücher können Sie bei wissenschaft-online bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

PREISRÄTSEL

Quarkon und Antiquarkon

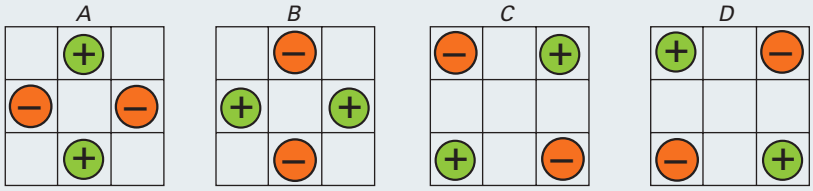
Von Paul von der Heyde

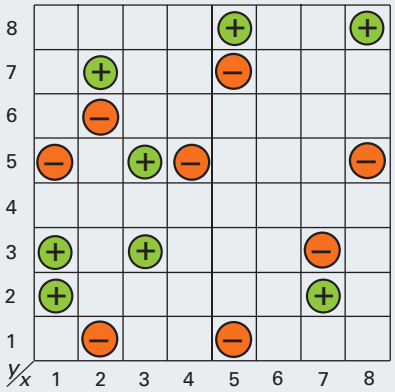
Man hielt bisher das Quarkon (+) für ein Teilchen, das nur zusammen mit einem zweiten Quarkon und zwei Antiquarkonen (–) als unzerlegbares Neutronium vorkomme, und zwar in den Molekülvarianten *A*, *B*, *C* und *D* (siehe unten).

Gestern nun gelang es Professor Nils Heisinger erstmals, ein Quarkon und ein Antiquarkon zu isolieren und in einem 8×8-Raster zu fixieren. Auf solch einem Raster kann ein Teilchen sich nicht bewegen. Heute morgen aber fand Heisinger viel mehr als zwei Teilchen vor (Skizze rechts).

Offenbar hatte sich über Nacht Neutronium auf dem Raster abgesetzt. Neutroniummoleküle reagieren zwar nicht untereinander, wohl aber mit Teilchen, die nicht zu Neutronium verbunden sind. Würde man beispielsweise in dem rechts abgebildeten Raster ein weiteres Molekül Neutronium *A* mit seinem Zentrum auf $(x, y) = (2, 5)$ platzieren, so würden ein Quarkon auf (2, 4) und ein zweites Antiquarkon auf (1, 5) erzeugt. Zugleich würden das Quarkon auf (3, 5) und das Antiquarkon auf (2, 6) vernichtet, das heißt, diese beiden Felder wären danach leer.

Auf welchen Rasterplätzen (x, y) fixierte Heisinger gestern die beiden Teilchen?





Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir einen Gutschen »BestChoice« im Wert von 30 Euro. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. 1. 2006, eingehen.

Lösung zu »Radwechsel« (November 2005)

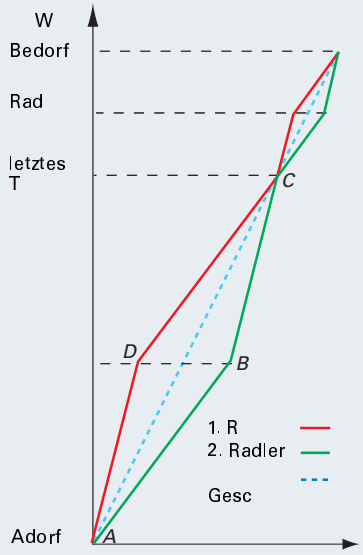
Der Abstand von Bedorf, in welchem der Vorausfahrende das Rad ein letztes Mal liegen lassen muss, ist gleich der halben Strecke zwischen Bedorf und dem letzten Treffen der beiden Radler. Dieser letzte Wechsel kann an einem beliebigen Punkt zwischen Bedorf und dem Mittelpunkt der Strecke Adorf–Bedorf liegen. Dabei spielt das Verhältnis der Geh- und Fahrgeschwindigkeiten keine Rolle.

Um nach einem Treffen wieder zur gleichen Zeit am gleichen Ort zu sein, müssen beide Radler gleich lange Zeit mit jeweils der gleichen Geschwindigkeit unterwegs gewesen sein. Daraus schloss Doris Kurz aus Altbach, dass sich zwischen zwei Treffen stets Parallelogramme im Weg-Zeit-Diagramm ergeben wie zum Beispiel *ABCD* (siehe Skizze rechts).

Da sich das Fahrrad von allein nicht bewegt, verläuft seine »Weltlinie«, die Gerade *BD*, parallel zur (horizontalen) Zeitachse. Aus Symmetriegründen folgt nun, dass die Dreiecke *BDA* und *DBC* die gleichen Höhen bezüglich der Basis *BD* haben. Das heißt, die mit dem Fahrrad zurückgelegte Strecke muss den gleichen Betrag haben wie die Strecke, die zu Fuß zurückgelegt wurde. Dies gilt sowohl für die letzte Wechselphase als auch für die Gesamtstrecke. Jeder der beiden muss also 30 Kilometer laufen und darf ebenso viele fahren.

Bernhard Müller aus Illertissen machte uns darauf aufmerksam, dass die Formulierung in der Aufgabenstellung »Nach einer beliebigen Distanz« nicht ganz korrekt ist. Fährt nämlich der erste Radler bereits mehr als 30 Kilometer, hat der Gehende keine Chance mehr, ihn einzuholen.

Niels Witt aus Flensburg machte sich Gedanken darüber, wie groß der Abstand *s* von Bedorf zum letzten Wechsel bei gegebener Gesamtstrecke s_{ges} sein muss, wenn alle Teilstrecken stets



gleich sein sollen. Dann gilt: $s = s_{ges}/(2n)$ mit $n = 1, 2, 3 \ldots$. Daraus ergeben sich Strecken von 30 km, 15 km, 7,5 km und so weiter.

Die Gewinner der drei Etuis »SwissCard Quattro« sind Bernd Baalmann, Lübeck; Karin Braun, Berlin; und Otto Stolz, Konstanz.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

PREISRÄTSEL

Quarkon und Antiquarkon

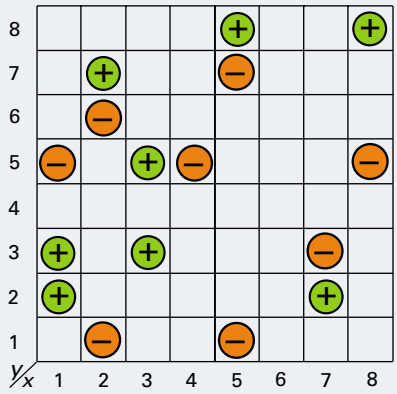
Von Paul von der Heyde

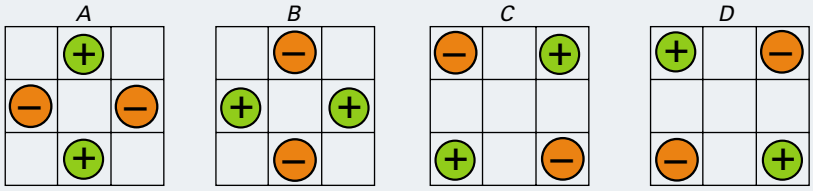
Man hielt bisher das Quarkon (+) für ein Teilchen, das nur zusammen mit einem zweiten Quarkon und zwei Antiquarkonen (–) als unzerlegbares Neutronium vorkomme, und zwar in den Molekülvarianten *A*, *B*, *C* und *D* (siehe unten).

Gestern nun gelang es Professor Nils Heisinger erstmals, ein Quarkon und ein Antiquarkon zu isolieren und in einem 8×8-Raster zu fixieren. Auf solch einem Raster kann ein Teilchen sich nicht bewegen. Heute morgen aber fand Heisinger viel mehr als zwei Teilchen vor (Skizze rechts).

Offenbar hatte sich über Nacht Neutronium auf dem Raster abgesetzt. Neutroniummoleküle reagieren zwar nicht untereinander, wohl aber mit Teilchen, die nicht zu Neutronium verbunden sind. Würde man beispielsweise in dem rechts abgebildeten Raster ein weiteres Molekül Neutronium *A* mit seinem Zentrum auf $(x, y) = (2, 5)$ platzieren, so würden ein Quarkon auf (2, 4) und ein zweites Antiquarkon auf (1, 5) erzeugt. Zugleich würden das Quarkon auf (3, 5) und das Antiquarkon auf (2, 6) vernichtet, das heißt, diese beiden Felder wären danach leer.

Auf welchen Rasterplätzen (x, y) fixierte Heisinger gestern die beiden Teilchen?





Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir einen Gutschen »BestChoice« im Wert von 30 Euro. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. 1. 2006, eingehen.

Lösung zu »Radwechsel« (November 2005)

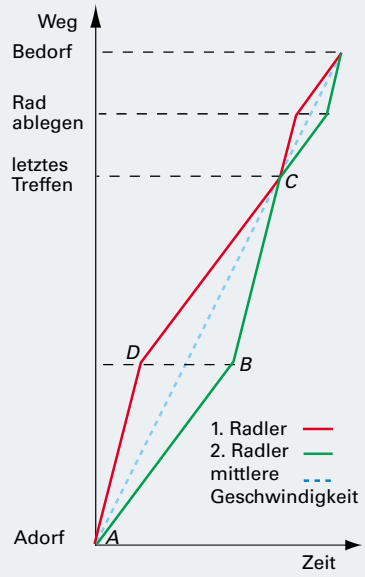
Der Abstand von Bedorf, in welchem der Vorausfahrende das Rad ein letztes Mal liegen lassen muss, ist gleich der halben Strecke zwischen Bedorf und dem letzten Treffen der beiden Radler. Dieser letzte Wechsel kann an einem beliebigen Punkt zwischen Bedorf und dem Mittelpunkt der Strecke Adorf–Bedorf liegen. Dabei spielt das Verhältnis der Geh- und Fahrgeschwindigkeiten keine Rolle.

Um nach einem Treffen wieder zur gleichen Zeit am gleichen Ort zu sein, müssen beide Radler gleich lange Zeit mit jeweils der gleichen Geschwindigkeit unterwegs gewesen sein. Daraus schloss Doris Kurz aus Altbach, dass sich zwischen zwei Treffen stets Parallelogramme im Weg-Zeit-Diagramm ergeben wie zum Beispiel *ABCD* (siehe Skizze rechts).

Da sich das Fahrrad von allein nicht bewegt, verläuft seine »Weltlinie«, die Gerade *BD*, parallel zur (horizontalen) Zeitachse. Aus Symmetriegründen folgt nun, dass die Dreiecke *BDA* und *DBC* die gleichen Höhen bezüglich der Basis *BD* haben. Das heißt, die mit dem Fahrrad zurückgelegte Strecke muss den gleichen Betrag haben wie die Strecke, die zu Fuß zurückgelegt wurde. Dies gilt sowohl für die letzte Wechselphase als auch für die Gesamtstrecke. Jeder der beiden muss also 30 Kilometer laufen und darf ebenso viele fahren.

Bernhard Müller aus Illertissen machte uns darauf aufmerksam, dass die Formulierung in der Aufgabenstellung »Nach einer beliebigen Distanz« nicht ganz korrekt ist. Fährt nämlich der erste Radler bereits mehr als 30 Kilometer, hat der Gehende keine Chance mehr, ihn einzuholen.

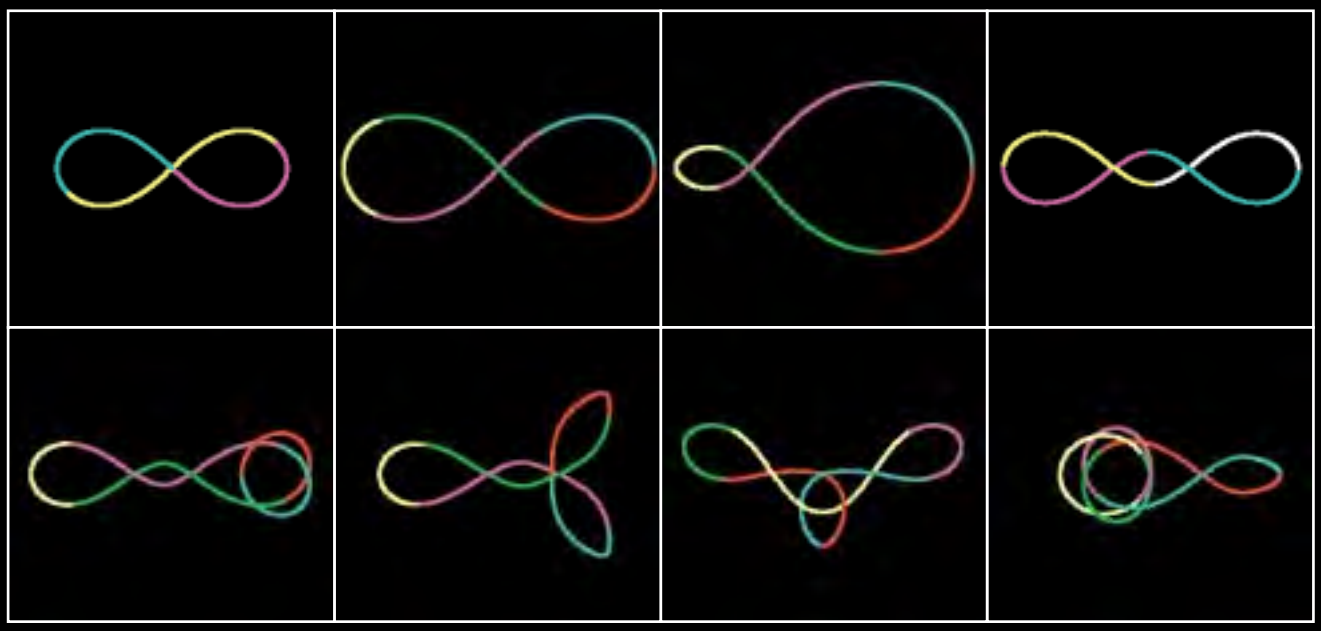
Niels Witt aus Flensburg machte sich Gedanken darüber, wie groß der Abstand *s* von Bedorf zum letzten Wechsel bei gegebener Gesamtstrecke s_{ges} sein muss, wenn alle Teilstrecken stets



gleich sein sollen. Dann gilt: $s = s_{ges}/(2n)$ mit $n = 1, 2, 3 \ldots$. Daraus ergeben sich Strecken von 30 km, 15 km, 7,5 km und so weiter.

Die Gewinner der drei Etuis »SwissCard Quattro« sind Bernd Baalmann, Lübeck; Karin Braun, Berlin; und Otto Stolz, Konstanz.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.



Himmlisches Ballett

Periodische Lösungen des *n*-Körper-Problems sind weitaus vielgestaltiger, als man bisher vermutete.

Von Christoph Pöppe

Es gibt eine Insel der Regelmäßigkeit im großen Chaos der Himmelsmechanik. Unter ganz besonderen Umständen vollführen drei Planeten (korrekter: Massenpunkte), die einander nach dem Newton'schen Gravitationsgesetz anziehen, nicht irgendwelche wilden Bewegungen, sondern eine, die sich wie ein Uhrwerk immer wieder periodisch wiederholt. Mehr noch: Die drei Körper durchlaufen – mit gehörigem zeitlichem Abstand – sämtlich dieselbe Bahn, und die liegt auch noch in der Ebene und hat die Form einer Acht, mit einem Kreuzungspunkt in der Mitte. Im November 2000 habe ich in dieser Zeitschrift die damals neue Entdeckung von Richard Montgomery und Alain Chenciner beschrieben (»Stabile Dreierbeziehung: die himmlische Achterbahn«, S. 15).

Der Fund war spektakulär, denn bis dahin konnte man die nichtchaotischen Lösungen des Dreikörperproblems (und allgemeiner des *n*-Körper-Problems) an einer Hand abzählen. Alsbald versuchten die Mathematiker, aus den Ideen von Montgomery und Chenciner noch weitere Lösungen herauszuholen. Und sie waren höchst erfolgreich!

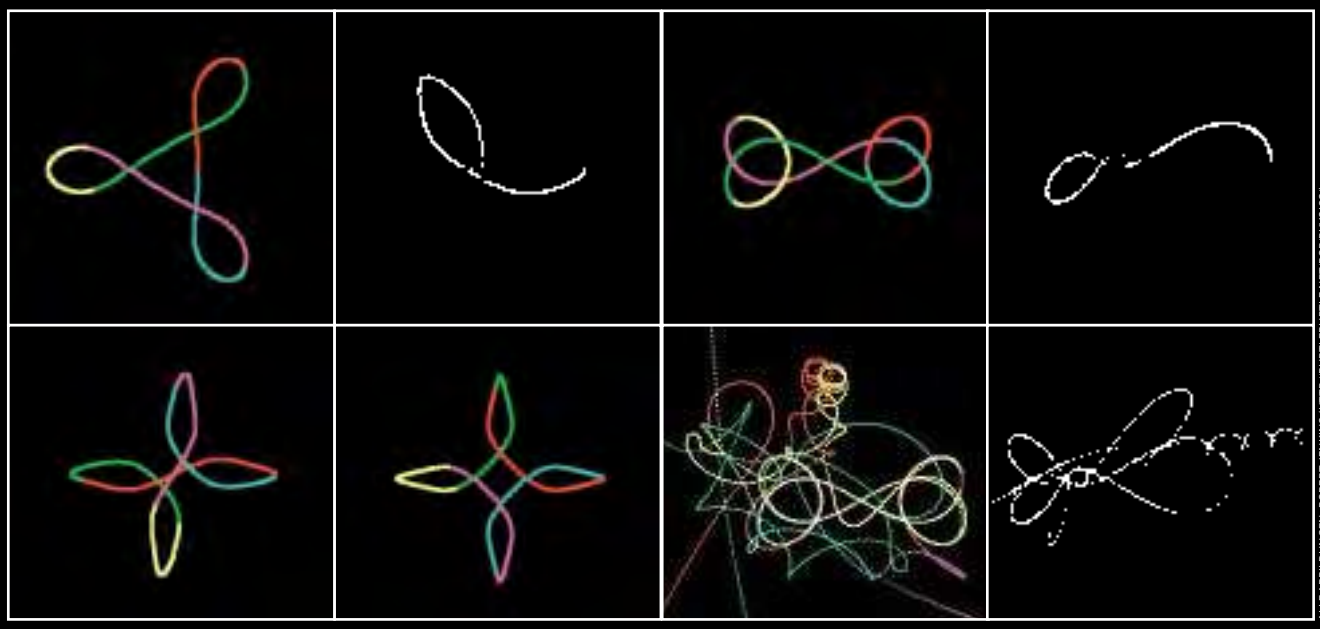
Die erste Überraschung war: Die Achterlösung war gar nicht so neu. Cristopher Moore, heute an der Universität von New Mexico in Albuquerque, hatte sie bereits 1993 entdeckt und beschrieben. Entscheidende Fortschritte brachten allerdings die numerischen Verfahren von Carles Simó von der Universität Barcelona. Er fand zahlreiche Anordnungen von drei oder mehr Körpern, die einander auf derselben Bahn hinterherlaufen; im Allgemeinen haben diese Bahnen nicht nur einen Kreuzungspunkt wie die Acht, sondern viele (Bild), liegen aber entgegen dem Anschein nach wie vor in einer Ebene.

Offensichtlich kommt es entscheidend auf das Timing an. Beim Überqueren eines Kreuzungspunkts muss jeder Körper eine Lücke im Querverkehr abpassen, und zwar so, dass er von den Kollegen beiderseits der Lücke möglichst gleichen Abstand hält. Sonst würde die Anziehungskraft des näheren überwiegen und ihn aus der Bahn werfen. Simó nennt dieses genau abgestimmte Bewegungsmuster eine »Choreografie«.

Mit dem Gravitationsgesetz ist nicht zu spaßen. Da die Anziehungskraft dem Quadrat des Abstands umgekehrt proportional ist, wird sie bei nahen Begegnungen sehr groß. Anders ausgedrückt: Sowie zwei Körper einander sehr nahe kommen, setzen sie eine unbeschränkte Menge an potenzieller Energie in kinetische um. Eine geringe Störung durch einen dritten Körper genügt dann, um beide auf Nimmerwiedersehen in den Weiten des Alls verschwinden zu lassen.

Man sucht aber Lösungen, bei denen genau das nicht passiert. Und die findet man mit dem »Prinzip der kleinsten Wirkung«: Man gibt sich die Positionen der *n* Körper für einen Anfangs- und einen Endzeitpunkt vor. Unter allen Bewegungen, welche die Körper vom einen in den anderen Ort überführen, gehorcht diejenige, die eine – eigens definierte – Größe namens »Wirkung« minimiert, dem Gravitationsgesetz. Numeriker wie Simó ändern daher eine probeweise angesetzte Bewegung per Computerprogramm so ab, dass deren Wirkung geringer wird. Die abgeänderte Bewegung kommt einer physikalisch korrekten schon etwas näher, wird nochmals abgeändert, und so weiter. Da die Wirkung bei Kollisionskursen oder gefährlich dichten Begegnungen sehr groß wird, neigt ein solches Minimierungsverfahren dazu, diesen Zuständen aus dem Wege zu gehen.

Merkwürdigerweise ist die Gravitationskraft für die Zwecke des Minimierungsverfahrens sogar ein bisschen zu



ALLE ABBILDUNGEN: ROBERT JENKINS (HTTP://BURTLEBURTLE.NET/BOB/PHYSICS/)

Himmlische Choreografien von Carles Simó: Drei bis fünf Massenpunkte durchlaufen hintereinander dieselbe Bahn. Die Farben kennzeichnen den Weg der »Himmelskörper« von einem willkürlichen Anfangspunkt aus, bis jeder den Startplatz seines Vorgängers eingenommen hat. Die beiden rechten Bilder unten zeigen leicht gestörte Versionen der darüberstehenden Bahnen.

schwach. In der Nähe von Kollisionszuständen steigt die Wirkung nicht dramatisch genug an, um das Verfahren unter allen Umständen von solchen Zuständen abzuschrecken. Das funktioniert erst in einer fiktiven Welt, in der die Gravitationskraft zum Beispiel der dritten statt der zweiten Potenz des Abstands umgekehrt proportional ist. Allerdings nimmt auch bei der Newton'schen Gravitation das Minimierungsverfahren keinen Zusammenstoß in Kauf, nicht einmal vorübergehend; aber das ist nur mit zusätzlichen Argumenten beweisbar.

Jedenfalls kann das Minimierungsverfahren die Reihenfolge, in der zwei Körper eine Kreuzung überqueren, nicht ändern, denn der Übergang von der einen zur anderen Reihenfolge besteht aus einem Kollisionskurs. Gibt man also dem Algorithmus als Startvorgabe eine irgendwie verknotete Bahn, dann bleibt sie verknotet, wenn das Verfahren zum Ziel führt. Und das gelingt, wie die Bilder zeigen, in vielen Fällen.

Die Bahnen der beteiligten Körper müssen auch nicht in einer Ebene liegen. In einem dreidimensionalen Koordinatensystem stehen die (x, y)-, die (x, z)- und die (y, z)-Ebene paarweise senkrecht aufeinander und haben alle drei den Nullpunkt gemeinsam. Man lasse in jeder dieser Ebenen einen Massenpunkt im Abstand 1 um den Nullpunkt kreisen, und zwar so, dass sich die drei Massen an den sechs Kreuzungspunkten der Kreise so weit wie möglich aus dem Weg gehen.

Damit daraus eine Lösung des Dreikörperproblems wird, müssen die Kreise noch etwas verbeult werden. Jeder Körper muss von der Ebene seiner Kreisbahn stellenweise nach links oder rechts abweichen, um die Anziehungskräfte seiner Kollegen, die im Allgemeinen nicht symmetrisch zu dieser Ebene stehen, zu kompensieren. Auf einer solchen deformierten Kreisbahn finden sogar Paare einander gegenüberstehender Körper oder größere Anzahlen gleichzeitig Platz, ohne den Kollegen auf den anderen Kreisbahnen in die Quere zu kommen.

Cristopher Moore hat außer diesen Dreifachringen noch weitere Anordnungen mit mehr als drei ineinander hängenden Bahnen gefunden.

Ist es denkbar, dass vielleicht irgendwo in einer fernen Galaxie ein echtes Planeten- oder Mehrfachsternsystem sich in so merkwürdigen Bahnen bewegt? Eher nicht. Die Existenz einer periodischen Lösung ist eine Sache, ihre Stabilität eine andere. Die meisten der von Simó gefundenen Bahnen halten selbst kleinen Störungen nur kurze Zeit stand. Außerdem drohen ausgedehnte Körper im Gegensatz zu Massenpunkten unter dem Angriff räumlich variierender Gravitationskräfte zu zerreißen. Nur die Acht, mit der alles anfing, scheint äußerst stabil zu sein.

Vieles zur Stabilität hat Robert Jenkins, im Hauptberuf Angestellter des Softwareherstellers Oracle, durch Probieren herausgefunden. Er schrieb extrem genaue Algorithmen für die Lösung des Anfangswertproblems: Verfolge, wie sich eine gewisse Anfangskonfiguration entwickelt. So kann er – neben vielen anderen Bahnen – für jede von Simós Lösungen vorführen, wie sie durch die unvermeidlichen Fehler der numerischen Näherung auseinander fliegt. Zwei Beispiele finden Sie rechts unten im Bild. ◁

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Braids in classical gravity. Von Cristopher Moore in: Physical Review Letters, Bd. 70, S. 3675, 1993

Action minimizing solutions of the Newtonian *n*-body problem: from homology to symmetry. Von Alain Chenciner. Online unter www.bdl.fr/Equipes/ASD/preprints/prep.2002/ICM2002.pdf

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

KENN BROWN

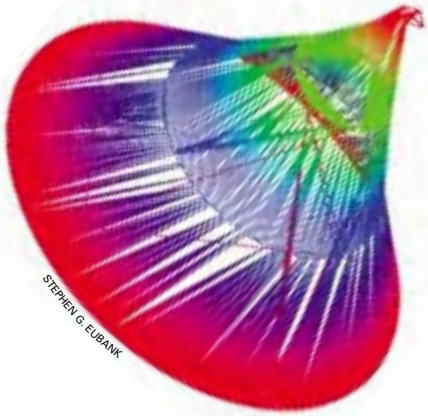
Stoppte der Mensch eine Eiszeit?

Vor 8000 Jahren war die Erde auf dem Weg in den Eiskeller. Doch dann kehrte sich der Klimatrend um. Lag es daran, dass die ersten Bauern durch Rodungen, Reisanbau und Viehzucht Treibhausgase freisetzten?

WEITERE THEMEN IM FEBRUAR

Hirntod und Wachkoma

Wenn alle Hirnfunktionen irreversibel ausgefallen sind, gilt nach breitem Konsens ein Mensch als biologisch tot. Wie steht es aber um das Wachkoma?



STEPHEN G. EUBANK

Epidemie-Simulation

Eine neue Methode unterstellt nicht mehr, eine Ansteckung sei ein Zufallsereignis, sondern modelliert Kontakte mit Infizierten viel genauer – fanden sie im Kindergarten, in der U-Bahn oder im Supermarkt statt? – und mit entsprechend besseren Ergebnissen

BRYAN CHRISTIE DESIGN

Rätselhafte Masse

Ein Elefant ist hundert Milliarden Mal schwerer als eine Ameise. Ähnlich verschieden sind die Massen im »Zoo der Elementarteilchen« – warum? Des Rätsels Lösung suchen Physiker in einem allgegenwärtigen Quantenfeld

JOHN HILL, LBTO

Größtes Fernglas der Welt

Im Süden Arizonas entsteht ein völlig neuer Fernrohrtyp: Das Large Binocular Telescope nutzt zwei 8,4-Meter-Spiegel auf einer einzelnen Montierung